



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**



**EQUIPOS PARA CONTROLAR LA
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN
LOS PROCESOS INDUSTRIALES.**

**TRABAJO DE SEMINARIO DE TITULACIÓN
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
I N G E N I E R O Q U Í M I C O
P R E S E N T A
BLAS MALDONADO SÁNCHEZ**

ASESOR: I.Q. RODOLFO TORRES BARRERA

m345400



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/014/05

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: MALDONADO SÁNCHEZ BLAS

P r e s e n t e .

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I.Q. Rodolfo Torres Barrera
VOCAL	I.Q. Rafael Coello García
SECRETARIO	M. en C. Andrés Aquino Canchola
SUPLENTE	Biol. Guillermo González Martínez
SUPLENTE	I.Q. Dominga Ortiz Bautista

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

México, D.F., 18 de Marzo del 2005.

EL JEFE DE LA CARRERA

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M. en C. Andrés Aquino Canchola', written over a circular scribble.

M. EN C. ANDRES AQUINO CANCHOLA

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

Gracias señor por guiarme por el camino del bien y haberme permitido terminar mis estudios, dándome la fuerza y salud que me llevaron a cumplir los objetivos que me propuse para llevar a cabo este sueño que se ha hecho realidad.

A MIS PADRES

Esteban Maldonado Miranda y Margarita Sánchez Nájera, gracias por haberme dado la vida y por haberme regalado el tesoro más valioso que un hijo puede recibir de sus padres, tener la oportunidad de estudiar una carrera universitaria y terminarla, gracias por darme su apoyo y su confianza en todo momento, se de los esfuerzos y sacrificios que pasaron para que yo tuviera una educación, este triunfo es de ustedes; que Dios los bendiga.

A MIS HERMANOS

Esteban Maldonado Sánchez, Sergio Maldonado Sánchez y Felipe Maldonado Sánchez, que siempre he contado con su apoyo incondicional en todo momento, ustedes son el ejemplo y admiración para superarme cada día, los quiero no los decepcionare.

A MI FAMILIA

Por apoyarme cuando lo he necesitado, ayudándome económicamente y dándome ánimos para seguir adelante en todo momento y sin esperar nada a cambio, gracias por su apoyo y comprensión.

A MI ESCUELA

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza que pertenece a la Máxima Casa de Estudios la “Universidad Nacional Autónoma de México”; por haberme permitido ingresar a sus aulas y obtener los conocimientos necesarios para obtener el título de Ingeniero Químico.

A MIS PROFESORES

Por transmitirme sus conocimientos y experiencias adquiridas, especialmente a los profesores José Ponce Guerrero, Justino Rodolfo, Dominga Ortiz Bautista, Miguel Ángel Varela Cedillo, Pablo Eduardo Valero Tejeda, Benjamín Granados Rangel, Miguel José Flores Galaz, Bernardo Carreón Calderón, Néstor Noé López Castillo, Eduardo Vázquez y Rene de la Mora Medina.

Quiero dar gracias al mejor profesor de Matemáticas que tiene la FES Zaragoza, a el Físico Carlos Javier Martínez Gómez, gracias por sus excelentes clases, ya que con sus enseñanzas no tuve problemas en las demás materias y pude concluir la carrera.

AL I. Q. RODOLFO TORRES BARRERA

Gracias por haberme brindado la oportunidad de ser quien dirigiera el desarrollo de este proyecto y así obtener mi titulación.

A MIS AMIGOS

Con los que compartí tristezas y alegrías, así como retos que nos proponíamos al competir entre nosotros para saber quien sobresalía en las diferentes materias y ayudándonos entre nosotros para estudiar mejor, sin nunca llegar a tener ningún problema serio, Antonio Martínez Pablo, Carlos Valdez López, Hugo Miguel Flores †, Jorge Gallardo Quiroz, Martín Laguna Nava, Pedro Feria Hernández, Sergio Anselmo López.

Al club de los patanes con los que compartí momentos inolvidables, Andrés Rangel, Ángel Ayala, Arturo Rodríguez Cruz, Atenodoro, Braulio Cesar Marrón Arriola, Enedino Varela Montellano, Félix, Julio García Bautista, Martín Colón Téllez y Ricardo García.

A mis demás compañeros, de mi generación y de otras generaciones con los que compartí las aulas ofreciéndome su amistad incondicional, Adolfo López, Agustín Vázquez, Angélica Galino, Armando Jiménez, Cynthia Martínez, Daniel Morales, Dionisio Morales, Edgardo López, Enrique Cuellar, Fabián Hernández, Fabricio Espejel, German Barrios, Ivan Martínez, Jonhy Alex Tlatelpa, Juan Carlos Díaz, Juan Diego González, Julio Cesar Flores, Manolo Rodrigo García, Minerva Méndez, Octaviano Hernández, Oliver Yair Gutierrez, Patricia Vega, Rafael González, Ricardo Cortes, Rita Evaristo, Ricardo Andario, Roberto Larios, Salvador Martínez, Víctor Cortés, etc.



ÍNDICE

RESUMEN -----	iv
----------------------	----

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 <i>FUNDAMENTACIÓN DE LA ELECCIÓN DEL TEMA</i> -----	1
1.2 <i>IMPORTANCIA DEL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA INDUSTRIAL DE PARTÍCULAS</i> -----	1
1.3 <i>OBJETIVO</i> -----	3

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 <i>PARTÍCULAS</i> -----	4
2.2 <i>CARACTERIZACIÓN DE LA PARTÍCULA</i> -----	4
2.3 <i>CONTROL DE EMISIÓN DE PARTÍCULAS</i> -----	5
2.4 <i>FACTORES PARA DETERMINAR EL EQUIPO DE CONTROL ADECUADO</i> -----	6
2.5 <i>MECANISMOS DE COLECCIÓN DE PARTÍCULAS</i> -----	6
2.6 <i>EFICIENCIA DE COLECCIÓN</i> -----	8
2.7 <i>CAÍDA DE PRESIÓN</i> -----	9
2.8 <i>VELOCIDAD TERMINAL O DE ASENTAMIENTO</i> -----	10

CAPÍTULO III. CÁMARAS DE SEDIMENTACIÓN

3.1 <i>CÁMARAS DE SEDIMENTACIÓN</i> -----	12
---	----

CAPÍTULO IV. COLECTORES MECÁNICOS (CICLONES)

4.1 <i>SEPARADORES CICLÓNICOS</i> -----	14
4.2 <i>MECANISMOS DE OPERACIÓN DEL CICLÓN</i> -----	14
4.3 <i>TIPOS DE CICLONES</i> -----	14
4.4 <i>CONSTRUCCIÓN DEL CICLÓN</i> -----	17
4.5 <i>ENTRADA</i> -----	17
4.6 <i>CUERPO</i> -----	18
4.7 <i>DESCARGA DE POLVOS</i> -----	18
4.8 <i>SALIDA</i> -----	19
4.9 <i>VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN</i> -----	19
4.10 <i>CONFIGURACIONES DE DISEÑO DE CICLONES</i> -----	20
4.11 <i>DIÁMETRO DE DISEÑO DEL CICLÓN</i> -----	21
4.12 <i>CAÍDA DE PRESIÓN EN CICLONES</i> -----	22



CAPÍTULO V. COLECTORES HÚMEDOS (SCRUBBERS)

5.1 COLECTORES HÚMEDOS	23
5.2 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN	23
5.3 DISPOSITIVOS PARA COLECTORES HÚMEDOS	25
5.4 TORRES DE ASPERSIÓN	26
5.5 COLECTORES VENTURI	28
5.6 COLECTORES DE ORIFICIO	31
5.7 COLECTORES DE LECHO MÓVIL	33
5.8 COLECTORES DE ROTOR DE ASPERSIÓN VERTICAL	34
5.9 TORRES EMPACADAS	35
5.10 EFICIENCIA EN LAVADORES	36
5.11 CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LOS COLECTORES HÚMEDOS	37

CAPÍTULO VI. FILTROS DE TELA (CASAS DE BOLSAS)

6.1 FILTROS DE TELA	39
6.2 DISEÑO	39
6.3 CASAS DE BOLSAS	41
6.4 DISEÑOS PARA LA FILTRACIÓN	42
6.5 TIPOS DE LIMPIEZA DE LA BOLSA	44
6.5.1 Agitación	44
6.5.2 Flujo de aire invertido	46
6.5.3 Pulso de inyección de aire	48
6.6 COMPONENTES DE LA CASA DE BOLSAS	50
6.6.1 Bolsas	50
6.6.2 Coraza o Carcasa	51
6.6.3 Tolvas	51
6.6.4 Dispositivos de descarga	52
6.7 CONSTRUCCIÓN DEL FILTRO	52
6.8 FIBRAS	53
6.9 MECANISMOS DE FALLA DE LA BOLSA	54
6.10 VELOCIDAD DE FILTRACIÓN: RELACIÓN DE AIRE-TELA	55
6.11 COMPARACIONES DE LA LIMPIEZA DE LA BOLSA	55
6.12 CAÍDA DE PRESIÓN EN LOS FILTROS	56

CAPÍTULO VII. PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS

7.1 PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS	57
7.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS	57
7.3 PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS DE PLACA	58
7.4 PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS TUBULARES	59



7.5	<i>CARGA DE LAS PARTÍCULAS EN EL PRECIPITADOR</i>	59
7.6	<i>DESCARGA DE LAS PARTÍCULAS EN EL ELECTRODO DE COLECCIÓN</i>	60
7.7	<i>SEPARACIÓN DE LAS PARTÍCULAS EN LA TOLVA</i>	61
7.8	<i>COMPONENTES DE LOS PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS</i>	62
7.8.1	<i>Electrodos de descarga</i>	62
7.8.2	<i>Electrodos de colección</i>	65
7.8.3	<i>Coraza</i>	66
7.8.4	<i>Vibradores</i>	67
7.8.5	<i>Martillo</i>	67
7.8.6	<i>Impulso magnético</i>	68
7.8.7	<i>Vibrador eléctrico</i>	69
7.8.8	<i>Martillos giratorios para Electrodos de Descarga de Marco Rígido</i>	69
7.8.9	<i>Equipo de transformador y rectificador (T-R)</i>	70

CAPÍTULO VIII. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS EQUIPOS

8.1	<i>VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CÁMARAS DE SEDIMENTACIÓN</i>	71
8.2	<i>VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE COLECTORES MECÁNICOS</i>	71
8.3	<i>VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE COLECTORES HÚMEDOS</i>	71
8.4	<i>VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE FILTROS DE TELA</i>	72
8.5	<i>VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS</i>	73

CAPÍTULO IX. COSTO DE LOS EQUIPOS

9.1	<i>COSTO DE COLECTORES MECÁNICOS, PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS DE ALTO VOLTAJE Y FILTROS DE BOLSA</i>	75
9.2	<i>COSTOS DE COLECTORES HÚMEDOS</i>	76
9.3	<i>COSTO TOTAL INSTALADO PARA DISPOSITIVOS DE CONTROL DE PARTÍCULAS</i>	77
9.4	<i>COSTOS DE OPERACIÓN ANUALES PARA DISPOSITIVOS DE CONTROL DE PARTÍCULAS</i>	78
9.5	<i>COMPARACIÓN DE COSTO/EFICIENCIA PARA DISPOSITIVOS DE CONTROL DE PARTÍCULAS</i>	79

CAPÍTULO X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

GLOSARIO	82
-----------------	----

BIBLIOGRAFÍA	86
---------------------	----



RESUMEN

Como se sabe la contaminación atmosférica por medio de partículas es un problema que a todos nos preocupa, ya que tiene un impacto directo en el medio donde vivimos. Las partículas afectan tanto a las plantas como a los animales y al hombre, causándole daños a su salud.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer los diferentes tipos de dispositivos que se usan para controlar las emisiones de partículas en fuentes industriales. Así como en que tipo de proceso se recomienda usarlo, para minimizar la emisión de partículas.

Existen muchos dispositivos para el control de partículas, aquí solo se incluyen los siguientes equipos: cámaras de sedimentación, separadores mecánicos (específicamente ciclones), colectores húmedos (scrubbers), filtros de tela (casas de bolsas) y precipitadores electrostáticos.

Es importante señalar que solamente se hace una descripción general del equipo y de su funcionamiento, aunque se presentan una serie de ecuaciones no se lleva a cabo ningún cálculo para dimensionar el equipo en cuestión.

En lo que respecta al costo, solo se presenta una serie de figuras que sirven para tener una idea de cómo calcular el costo de los diferentes equipos usados para el control de la emisión de partículas.

Con esto se pretende preparar el terreno para tener un base teórica robusta, para el desarrollo de trabajos futuros en este rubro.

Además puesto que todos los Ingenieros Químicos estamos comprometidos con la protección del ambiente, podemos aplicar nuestros conocimientos en bien de la humanidad.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN



CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 FUNDAMENTACIÓN DE LA ELECCIÓN DEL TEMA

En las 2 décadas pasadas, la profesión del ingeniero químico ha sido ampliamente influenciada por su responsabilidad con la sociedad. Esta responsabilidad ha sido dirigida hacia la protección del bienestar y la salud pública, y es guiada por una multitud de regulaciones ambientales.

Las emisiones de contaminantes arrojadas por las industrias a la atmósfera, aunadas a las condiciones naturales del medio, como el viento y las características del lugar, dan origen a reacciones químicas, comúnmente conocidas como contaminación.

Nuestra responsabilidad es considerar acciones de prevención para evitar que el medio se siga deteriorando; es aquí donde el ingeniero químico puede aportar muchos de los conocimientos adquiridos, ya que conoce los efectos de la combinación de sustancias químicas que son arrojadas por las industrias derivadas de cambios en los procesos con fenómenos naturales, lo que da como resultado contaminantes atmosféricos peligrosos o tóxicos, cuya corrosividad y toxicidad generan una disposición ácida, destrucción de la capa de ozono y efectos de invernadero.

Por todo esto, el ingeniero químico tiene la posibilidad de prevenir, **controlar** y evitar las emisiones y que estas lleguen a la atmósfera y cuerpos receptores, las cuales pueden modificar el entorno donde vivimos.

1.2 IMPORTANCIA DEL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA INDUSTRIAL DE PARTÍCULAS

El aire es una mezcla de gases que rodean la Tierra en una capa relativamente delgada. La mayor parte del aire (95%) se encuentra dentro de los primeros 20 km sobre el nivel del mar, por encima de los cuales disminuye en densidad hasta desvanecerse de manera gradual en el vacío del espacio, algunos cientos de kilómetros sobre la superficie de la Tierra.

Los componentes principales del aire son, N₂ (78.09%), O₂ (20.95%), CO₂ (0.03%) y otros gases (0.93%), los cuales no reaccionan entre sí bajo circunstancias normales.

El aire que respiramos los habitantes de las ciudades está contaminado, y su grado de contaminación depende, entre otros factores, del tamaño, densidad de población y desarrollo económico - social alcanzado, siendo éste un problema generalizado que no puede atribuirse en modo alguno al actual periodo de la civilización.

La contaminación atmosférica. Es la condición en la cual se encuentran presentes en el aire algunas sustancias en concentraciones superiores a los niveles ambientales normales, de tal forma que produzcan efectos indeseables en el hombre, los animales, la vegetación o los materiales.



El **control** es aquel que se añade a los procesos que generan contaminación con la finalidad de destruir o capturar los contaminantes. La técnica elegida para controlar la emisión de contaminantes en una determinada fuente depende de muchos factores; el más importante es si el contaminante es un gas o una partícula.

Para reducir las emisiones de los contaminantes de procesos industriales, el sistema de control debe ser diseñado para cumplir las limitaciones al mínimo costo con máxima seguridad. El cambio básico implica decisiones entre la eficiencia de colección, costos de instalación, y costos de operación.

Se ha dicho acertadamente que la prevención de la contaminación del aire, proveniente de fuentes industriales se inicia dentro de la fábrica o planta.

No es necesario tener que depender de dispositivos de limpiezas de los gases y de chimeneas altas de descarga a fin de reducir las emisiones y dispersar y diluir las sustancias perjudiciales a concentraciones tolerables a nivel del suelo, cuando el control del proceso y del sistema sea efectivo en evitar la formación y descarga de los contaminantes al aire, de cualquier manera, es posible reducir las emisiones por otros métodos como por ejemplo:

1. Limpieza de los gases.
2. Reubicación de la fuente.
3. Sustitución del combustible.
4. Cambios en el proceso.
5. Práctica operaria buena.
6. Clausura de la fuente.
7. Dispersión.

Si la consideración de un problema de contaminación lleva a la conclusión de que es necesario un equipo de limpieza para los gases, están disponibles numerosos dispositivos y técnicas de control. Se ha manifestado que una industria puede eliminar cualquier cantidad de partículas si está dispuesta a pagar por la limpieza en la caída de presión, capital de inversión, y costo de operación.

Los tipos básicos de dispositivos para el **control** de las emisiones de partículas son:

- ✓ Cámaras de Sedimentación
- ✓ Colectores Mecánicos (Ciclones)
- ✓ Colectores Húmedos (Scrubbers)
- ✓ Filtros de Tela (Casas de bolsas)
- ✓ Precipitadores Electrostáticos

Todos estos han sido usados para controlar las emisiones de una variedad de procesos, con el procedimiento de selección casi siempre dictado por la experiencia.



Como se ve, la contaminación atmosférica es un problema mundial que preocupa a toda la sociedad por los efectos que esta produce; por lo que es un reto para el Ingeniero Químico del siglo XXI tratar de resolver este problema.

1.3 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es dar a conocer los principales equipos que se usan en las industrias de procesos para prevenir y controlar la contaminación atmosférica y cumplir con regulaciones establecidas por la normas ambientales, esto se llevara a cabo dando seguimiento a los siguientes objetivos:

- ✓ Identificar cuales son los equipos que existen para el control de la contaminación ambiental.
- ✓ Explicar el funcionamiento del equipo para controlar la contaminación ambiental.
- ✓ Determinar el equipo adecuado para el proceso químico que se desee controlar.
- ✓ Determinar el costo del equipo para el control de la contaminación.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO



CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 PARTÍCULAS

La materia en forma de partícula producida por fuentes incluye la sal de los océanos, cenizas volcánicas, productos de la erosión por el viento, polvo de las carreteras, desechos de incendios forestales, el polen y las semillas de plantas.

Las partículas presentan un riesgo para los pulmones; incrementan las reacciones químicas en la atmósfera; reducen la visibilidad; aumentan la posibilidad de la precipitación, la niebla y las nubes; reducen la radiación solar, con los cambios en la temperatura ambiental y en las tasas biológicas de crecimiento de las plantas; y ensucia las materias del suelo.

La magnitud del problema en cada una de las áreas anteriores es una función del rango del tamaño de las partículas presentes en la atmósfera local, la concentración de las partículas y las composiciones química y física de las partículas.

Por partícula se entiende toda aquella materia con un tamaño entre $0.0002 \mu\text{m}$ y $500 \mu\text{m}$, y en conjunto, se designan como partículas suspendidas totales (PST).

El tamaño es la principal característica física de las partículas. Aquéllas que tienen tamaño superior a los $50 \mu\text{m}$ se observan a simple vista mientras que para las inferiores a $0.005 \mu\text{m}$ se requiere de un microscopio electrónico.

Las partículas inferiores a $1 \mu\text{m}$ no sedimentan rápidamente. El tamaño promedio de las partículas en la Ciudad de México, se estima que es de $0.49 \mu\text{m}$.

Las partículas se pueden clasificar, de acuerdo con su origen, en polvo, humo, fumos, cenizas volantes, niebla y aerosoles. Las primeras cuatro son sólidas y las dos últimas líquidas.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE LA PARTÍCULA

Características de la partícula tal como tamaño, forma y densidad debe ser considerado cuando se diseñan sistemas de control. Las partículas son el sólido dividido finamente o material líquido que existe como partículas en la chimenea de gas.

El tamaño de la partícula es usualmente expresado en términos del diámetro aerodinámico. El diámetro aerodinámico describe como la partícula se mueve en una corriente de gas.

Los diámetros de la partícula son medidas en unidades de micrómetros (μm). Las partículas con diámetros grandes ($> 10 \mu\text{m}$) pueden ser colectadas en los ciclones.



Las partículas que tiene diámetros pequeños ($< 5 \mu\text{m}$) deben ser colectados en dispositivos más sofisticados tales como colectores (scrubbers), casas de bolsas (baghouses) o precipitadores electrostáticos. De este modo, la eficiencia de colección de un dispositivo de control específico depende en el tamaño de las partículas en la corriente del gas de descarga.

Los dispositivos llamados impactadores son comúnmente usados para determinar la distribución del tamaño de las partículas de las corrientes de los gases de descarga de fuentes industriales.

El impactador es insertado en la chimenea y una muestra de la corriente es arrastrada a el impactador. Las partículas impactan en placas de colección o impactación de acuerdo a su tamaño aerodinámico.

2.3 CONTROL DE EMISIÓN DE PARTÍCULAS

Ciclones, casas de bolsas, precipitadores electroestáticos y colectores húmedos son usados para reducir la emisión de partículas de fuentes industriales. Cada uno de estos dispositivos colectan partículas por mecanismos que implican una fuerza aplicada.

La fuerza más simple de colección es la gravedad. Las partículas grandes se mueven bastante lentas en una corriente de gas las cuales pueden ser superadas por la gravedad y ser colectadas.

La gravedad es la responsable para coleccionar partículas en un dispositivo simple tal como una cámara de sedimentación.

La cámara de sedimentación fue uno de los primeros dispositivos usados para controlar la emisión de partículas; de cualquier manera, muy raramente es usado hoy en día.

Por que su efectividad en la colección de partículas es muy baja, esta no puede ser usada para cumplir con la mayoría de las regulaciones para la contaminación del aire.

De cualquier manera, la cámara de sedimentación puede ser usada como un prelimpiador para otros dispositivos de control de partículas, para remover partículas más grandes.

La unidad es construida como una caja horizontal larga, con una entrada, cámara, salida, y tolvas para colección del polvo. La velocidad de la corriente de gas cargada de partículas es reducida en la cámara.

Todas las partículas en la corriente de gas son sometidas por la fuerza de gravedad. A la velocidad del gas reducida en la cámara, las partículas grandes (mayores que $40 \mu\text{m}$ en diámetro) son influenciadas por la gravedad y caen en las tolvas.



Otra fuerza de colección usada para capturar partículas es la fuerza centrífuga. La forma o curvatura del colector causa que la corriente de gas rote en un movimiento en espiral.

Las partículas grandes se mueven hacia el exterior de la pared por virtud de su momentum. Las partículas pierden energía cinética y son separadas de la corriente de gas.

Las partículas son entonces vencidas por la fuerza gravitacional y son colectadas. Las fuerzas centrífugas y gravitacionales son ambas responsables para la colección de partículas en un ciclón.

En filtros de tela y colectores húmedos, tres fuerzas de separación son responsables para colección de partículas: impactación por inercia, intercepción directa y difusión.

En un filtro de tela, el objeto principal para capturar partículas es un filtro con un lecho estacionario soportado por la tela. En un colector húmedo, el objeto principal es una gota de agua.

2.4 FACTORES PARA DETERMINAR EL EQUIPO DE CONTROL ADECUADO

Es necesario determinar cierto número de factores antes de poder hacer una apropiada selección del equipo de colección. Entre los datos requeridos más importantes se encuentran los siguientes: las propiedades físicas y químicas de las partículas; el intervalo de la tasa de flujo volumétrico de la corriente del gas; el intervalo de las concentraciones de partículas que se podrían esperar (cargas de polvo); la temperatura y presión de la corriente de flujo; la humedad; la naturaleza de la fase gaseosa como por ejemplo las características corrosivas y de solubilidad); y la condición requerida por el efluente tratado.

Este último elemento de información puede ser el más importante, ya que indica la eficiencia de colección que se ha de cumplir, ya sea por una sola pieza de equipo o varias operando en serie.

2.5 MECANISMOS DE COLECCIÓN DE PARTÍCULAS

Los seis mecanismos disponibles para la colección de las partículas se puede clasificar como de sedimentación por gravedad, impactación centrífuga, impactación por inercia, intercepción directa, difusión y los efectos electrostáticos. Uno o más de estos mecanismos son responsables de la remoción de las partículas en cualquiera de los dispositivos industriales de colección que se comentan en los siguientes capítulos.

Los fenómenos que implican las fuerzas gravitacionales, centrífugas y electrostáticas son bien conocidas por los ingenieros y científicos. De cualquier forma, es apropiado establecer en este punto las diferencias entre el impacto por inercia (figura 2-1), la intercepción directa (figura 2-2), y la difusión (figura 2-3), estos tres mecanismos se describen a continuación.

Cuando una partícula es arrastrada por la corriente de gas, la partícula no pueden seguir las líneas de flujo alrededor del cuerpo colector (gota de líquido o fibra), y como resultado impacta en el cuerpo colector (Figura 2-1).

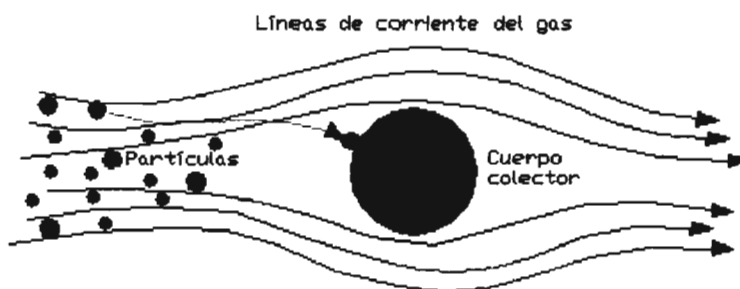


Figura 2-1. Impactación por inercia.

Si una línea de corriente de fluido pasa a una distancia del cuerpo colector (gota de líquido o fibra) dentro de un radio de partícula, una partícula que se desplace siguiendo dicha línea de flujo tocará el cuerpo y podrá ser recolectada (Figura 2-2).

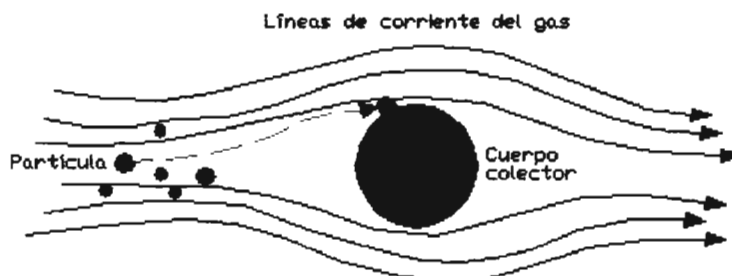


Figura. 2-2. Intercepción directa

Las partículas muy pequeñas también pueden ser recolectadas por el mecanismo de difusión. Las partículas son continuamente bombardeadas por moléculas de gas cuando ellas se mueven en una corriente de gas. Este bombardeo puede causar que se muevan primero de una manera y después de otra manera al azar (se difunden a través del gas). Este movimiento al azar puede eventualmente causar que las partículas choquen con el cuerpo colector y pueden ser colectadas (Figura 2-3).

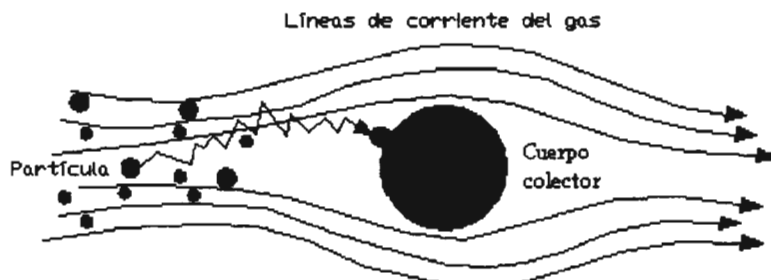


Figura 2-3. Difusión



Las partículas son arrastradas a aproximadamente a la misma velocidad que la del gas en una tubería. Debido a su extrema ligereza, el gas se mueve en flujo laminar alrededor de cualquier objeto en su camino. Sin embargo, la partícula sólida con una masa mucho más pesada resiste los cambios de movimiento. Mientras mayor sea la partícula menor será su tendencia a cambiar de dirección.

En general, las partículas arrastradas por el aire varían su tamaño desde 0.001 a 500 μm , con la mayor parte de la masa de partículas presentes en la atmósfera con una variación de 0.1 a 10 μm . Las partículas con un tamaño menor de 0.1 μm muestran un comportamiento similar al de las moléculas y están caracterizadas por grandes movimientos aleatorios causados por colisiones con las moléculas de gas.

Las partículas mayores de 1 μm , pero menores de 20 μm , tienden a seguir el movimiento del gas por el que son llevadas. Las partículas mayores de 20 μm poseen velocidades de asentamiento significativas; por lo tanto, el aire las arrastra durante períodos cortos.

Es muy poco probable que cualquier tipo de equipo de colección sea efectivo en la remoción de partículas dentro de un intervalo tan amplio. A pesar de que un tipo de colector determinado puede eliminar partículas dentro del total del intervalo indicado, la eficiencia de remoción es, en muchos casos, una función del tamaño de la partícula. Por ejemplo, un colector puede remover partículas grandes en una amplitud dada con eficiencia de casi el 100 por ciento, pero la eficiencia del colector en la remoción de partículas más pequeñas, puede estar muy cerca de cero.

2.6 EFICIENCIA DE COLECCIÓN

El rendimiento del equipo para controlar la contaminación del aire es frecuentemente evaluado en términos de su eficiencia de colección. La eficiencia de colección es definida como el porcentaje de reducción en la concentración de los contaminantes entre la entrada y salida del dispositivo de control (Ecuación 2-1).

$$\left(\begin{array}{c} \text{Eficiencia de Colección} \\ \text{En peso} \end{array} \right) = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{Conc. de Contaminantes} \\ \text{en la Entrada} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Conc. de Contaminantes} \\ \text{en la Salida} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} \text{Conc. de Contaminantes} \\ \text{en la Entrada} \end{array} \right)} \times 100\% \quad (2-1)$$

Un valor alto para la eficiencia indica que un mayor grado de control es alcanzado en la fuente. Un valor bajo indica que menor control ocurre con más contaminantes emitidos en la atmósfera.

Los límites de emisión son usualmente fijos por la existencia de regulaciones para la contaminación del aire. El control para ser alcanzado depende en la concentración de salida permitida y la cantidad de emisiones generadas por el proceso.



Por ejemplo, supongamos que una fuente emite 1800 mg/m^3 de partículas de su chimenea (no controlada). Si la regulación establece que la velocidad de emisión máxima permitida no puede exceder 90 mg/m^3 , entonces la eficiencia de colección debe ser:

$$(\text{Eficiencia de Colección}) = \frac{1800 - 90}{1800} = 0.95 \text{ ó } 95 \%$$

Para cumplir las regulaciones en este caso, un dispositivo de control que tenga una eficiencia de colección del 95 % debe ser instalado en esta fuente. El equipo para controlar la contaminación del aire es frecuentemente diseñado específicamente para la fuente industrial en la cual es instalada.

Varios factores de diseño deben ser considerados, uno es la concentración o carga de granos de partículas contaminantes en la corriente de los gases de escape del proceso. La concentración del contaminante típicamente se expresa en términos de libras por pie cúbico (lb/ft^3), granos por pie cúbico (gr/ft^3) y gramos por pie cúbico (g/ft^3).

El nivel y fluctuación de carga de granos son muy importantes. Algún dispositivo de control, tal como filtros de tela, no son afectados relativamente por altos niveles o grandes fluctuaciones en la concentración de las partículas.

Otros tales como precipitadores electrostáticos, generalmente no funcionan efectivamente con grandes fluctuaciones en los niveles de concentración. Otro problema relacionado puede ocurrir cuando la velocidad de los gases de descarga cambian rápidamente. Algunos dispositivos de control son diseñados para operar a velocidades de gases de descarga específicos. Las partículas grandes en las velocidades del gas pueden afectar drásticamente la eficiencia de colección de la unidad.

2.7 CAÍDA DE PRESIÓN

Otra característica importante de los dispositivos de control es el efecto que ellos tienen en el flujo de los gases de descarga en un proceso industrial. Una resistencia al flujo de gas puede acumularse, especialmente si el gas debe ser forzado a través de pequeñas restricciones o aberturas.

La caída de presión es una medida de la resistencia del aire a través de un sistema. La caída de presión, también llamada caída de presión del gas, describe la caída de presión del gas entre las secciones de entrada y salida del dispositivo de control.

Los colectores con caídas de presión grandes pueden requerir ventiladores grandes (y grandes requerimientos de energía) para empujar o arrastrar los gases de descarga a través del sistema.



Un incremento en la caída de presión significa que hay una pérdida de presión grande en el sistema. Algunos dispositivos de control tal como venturi scrubbers son diseñados para operar a presiones altas [tan grandes como 254 cm H₂O (100 in. H₂O)]. Por otra parte, los precipitadores electrostáticos son diseñados para operar a caídas de presión mucho más bajas [usualmente menos que 2.54 cm H₂O (1.0 in. H₂O)].

2.8 VELOCIDAD TERMINAL O DE ASENTAMIENTO

Un método básico para remover las partículas consiste simplemente en el asentamiento por gravedad. Esta técnica se utiliza tanto por la naturaleza como por los diseñadores de equipo industrial. Hay un parámetro importante que determina su utilidad; se trata de la velocidad terminal o de asentamiento (rapidez) de una partícula, V_t .

Se define como la velocidad descendente constante que alcanza la partícula en una dirección paralela al campo gravitacional terrestre, según sobrepase las fuerzas debidas a la flotación y la resistencia de fricción. (El tiempo necesario para alcanzar la velocidad terminal es extremadamente corto, y en general no se toma en cuenta).

El polvo de las partículas en suspensión puede tomar muchas formas, no sólo como resultados de su proceso de formación sino también por la aglomeración posterior de las partículas en el polvo del escape o en la atmósfera.

A fin de simplificar cualquier estudio inicial, es conveniente suponer *partículas esféricas*. Cualquier mejora adicional en el modelo requerirá evidencia experimental adicional. Para partículas esféricas, se tiene la siguiente ecuación

$$V_t = \left[\frac{4gd_p(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g C_D} \right]^{1/2} \quad (2-2)$$

donde d_p es el diámetro de la partícula. El coeficiente de resistencia para las partículas esféricas se obtiene fácilmente en la literatura, y se gráfica usualmente como una función del número de Reynolds, Re , que carece de dimensión.

Por definición, $Re = \rho_g Vd/\mu$, donde d es una longitud característica como el diámetro, y μ es la viscosidad dinámica del fluido.

La región del número de Reynolds entre 10^{-4} y 0.5 se conoce como el **régimen de Stokes o de flujo laminar**.

En este caso, la evidencia experimental para las esferas indica que

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (\text{flujo laminar, esferas}) \quad (2-3)$$



Nótese también que en los estudios del aire atmosférico $\rho_p \gg \rho_g$. Estas dos condiciones permiten escribir la ecuación (2-2) para partículas esféricas, en la forma

$$V_t = \frac{gd_p^2 \rho_p}{18\mu_g} \quad (\text{flujo laminar}) \quad (2-4)$$

esta expresión se conoce como la *ley de Stokes*. Hablando en términos generales, esta ecuación es muy exacta para partículas esféricas con diámetros menores de 50 μm y se usa frecuentemente con poco error para tamaños de partículas de hasta 100 μm o algo menor.

Este intervalo de aproximadamente 1 a 100 μm es un intervalo importante de tamaños para los polvos industriales.

Para partículas menores de aproximadamente 5 μm , d_p se acerca al recorrido o trayectoria libre media de las moléculas de gas en la atmósfera.

Las partículas tienden ahora a deslizarse junto a las moléculas de gas, y la velocidad de asentamiento se hace mayor que la pronosticada por la ley de Stokes.

No obstante, para una partícula de 1 μm de diámetro, el valor de V_t será de un 15 por ciento mayor que el valor de la ley de Stokes.

La relación de V_t para estos tamaños pequeños es

$$V_t = K_C V_{t,Stokes} \quad (2-5)$$

y conoce como la ley de *Stokes-Cunningham*.

La corrección de K_C , esta razonablemente aproximada por

$$K_C = 1 + \frac{9.73 \times 10^{-3} T^{1/2}}{d_p} \quad (2-6)$$

donde d_p está expresada en micrómetros y T en grados Kelvin.

En la región de transición entre el flujo laminar y el turbulento alrededor de una partícula esférica, la curva del coeficiente normal de resistencia, se puede modelar por medio de la ecuación

$$C_D = 0.22 + \frac{24}{\text{Re}} \left[1 + 0.15(\text{Re})^{0.6} \right] \quad (2-7)$$



CAPÍTULO III.

CÁMARAS DE SEDIMENTACIÓN

CAPÍTULO III. CÁMARAS DE SEDIMENTACIÓN

3.1 CÁMARAS DE SEDIMENTACIÓN

Una cámara de sedimentación es una cámara bastante grande, por lo que la velocidad del gas es reducida suficientemente para permitir al polvo o a las gotas sedimentar fuera del gas por la acción de la gravedad.

Una cámara de sedimentación usualmente consiste de una cámara horizontal rectangular, con una entrada en un extremo y una salida en el otro, con o sin placas horizontales (Figura 3-1).

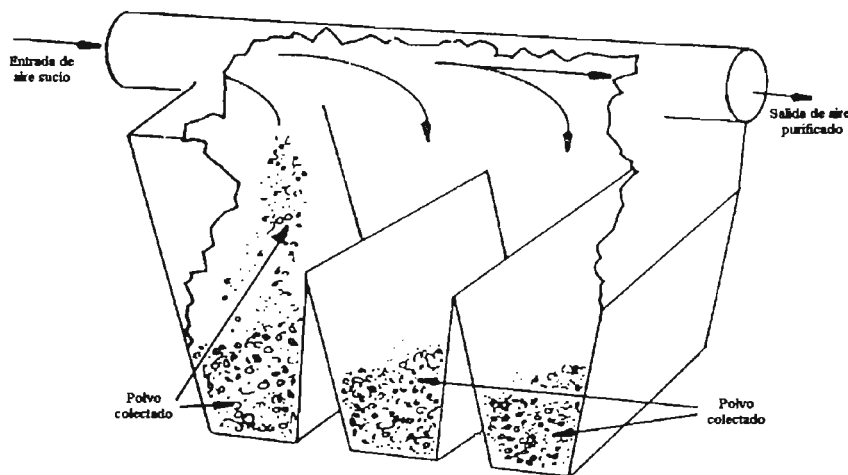


Figura 3-1. Cámara de sedimentación

La velocidad en la cámara de sedimentación es bastante baja por lo que la turbulencia es minimizada y el flujo del gas que entra y sale de la cámara es bien distribuido, el rendimiento es expresado por

$$\eta = \frac{100u_t L}{HV} \quad (3.1)$$

Donde

- η = Eficiencia, en por ciento en peso
- u_t = Velocidad de sedimentación del polvo, ft/seg
- L = Longitud de la cámara, ft
- H = Altura de la cámara, ft
- V = Velocidad del gas, ft/seg

Bajo las suposiciones anteriores y combinando la ley de Stokes con la ecuación (3.1) el tamaño de partícula (esférica) mínimo que puede ser separado se calcula por



$$D_p = \sqrt{\frac{18\mu HV}{gL(\rho_p - \rho)}} \quad (3.2)$$

Donde

D_p = Tamaño de partícula mínimo colectada a 100% de eficiencia.

μ = Viscosidad del gas, lb/ft-seg.

g = constante gravitacional, 32.3 ft/seg²

ρ_p = Densidad de la partícula, lb/ft³

ρ = Densidad del gas, lb/ft³

Placas horizontales en la cámara de sedimentación, colocadas en un arreglo inclinado, reduce la distancia vertical a través del cual las partículas deben de sedimentar. El rendimiento de tal cámara es dado por la ecuación (3.3) y (3.4).

Esta ecuación permite calcular el rendimiento, para las cámaras de sedimentación con placas horizontales.

$$\eta = \frac{Nu_i WL}{q} \quad (3.3)$$

Por medio de esta ecuación se utiliza para calcular el diámetro mínimo de la partícula.

$$D_p = \sqrt{\frac{18\mu HV}{gL(\rho_p - \rho)}} \quad (3.4)$$

Donde

N = Número de placas

W = ancho de la cámara, ft

q = velocidad del flujo del gas ft³/min

Un diseño cuidadoso de la cámara de sedimentación es necesario para proporcionar una buena distribución del gas que entra y sale de la cámara de sedimentación.

Los tipos usuales de diseño incluyen transiciones graduales, divisores, o placas de distribución perforadas.

La velocidad del gas en la cámara debe ser generalmente restringida a 600 ft/min o menos para prevenir el rearrastre excesivo.

Las cámaras de sedimentación con placas horizontales ofrecen mayor eficiencia en un pequeño espacio, pero presentan problemas difíciles de limpieza; probablemente el método más efectivo de limpieza es lavar las placas con rocíos de agua.



CAPÍTULO IV

COLECTORES MECÁNICOS (CICLONES)



CAPÍTULO IV. COLECTORES MECÁNICOS (CICLONES)

4.1 SEPARADORES CICLÓNICOS

Los separadores ciclónicos son dispositivos purificadores del gas que emplean una fuerza centrífuga generada haciendo girar una corriente de gas con el fin de separar las partículas (sólidas o líquidas) del gas que las transporta.

La unidad separadora puede ser una sola cámara grande, unas cuantas cámaras tubulares, en paralelo o en serie, o una unidad dinámica similar a un soplador.

Las unidades en paralelo suministran un aumento en la capacidad volumétrica, mientras que las unidades en serie proporcionan un aumento en la eficiencia de remoción.

4.2 MECANISMOS DE OPERACIÓN DEL CICLÓN

La fuerza centrífuga debida a una alta tasa de rotación, lanza las partículas de gas contra las paredes externas del cilindro y del cono. Las partículas resbalan por las paredes hasta llegar a la tolva de almacenamiento.

El gas gradualmente purificado invierte su espiral descendente y forma una espiral de dimensiones menores. Un tubo alimentador del vórtice que se extiende hacia abajo dentro del cilindro ayuda a dirigir el vórtice interno fuera del ciclón.

4.3 TIPOS DE CICLONES

Existen dos clases principales de separadores ciclónicos: los tipos de paletas axiales, y los de involuta. La única diferencia que existe entre los dos se basa en el método de introducción del gas dentro del casco cilíndrico con el propósito de impartirle un movimiento giratorio que sea suficiente.

En el separador ciclónico de involuta mostrado en la (Figura 4-1), el movimiento circular se obtiene por medio de una entrada tangencial del gas.

El pasaje de entrada de involuta rectangular tiene su pared interior tangente al cilindro, y la entrada ha sido diseñada para que se incorpore gradualmente con una involuta de 180°.

En la (Figura 4-2), se muestra un ciclón de paletas axiales. En este caso, el movimiento ciclónico se imparte por un anillo de paletas al gas impuro que desciende gradualmente.

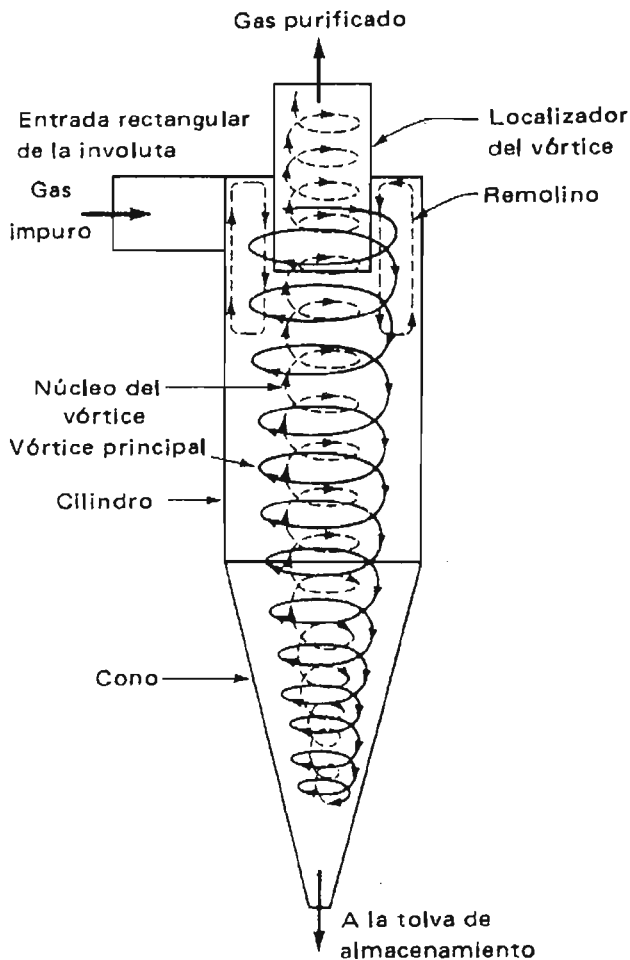


Figura 4-1. Separador ciclónico de involuta

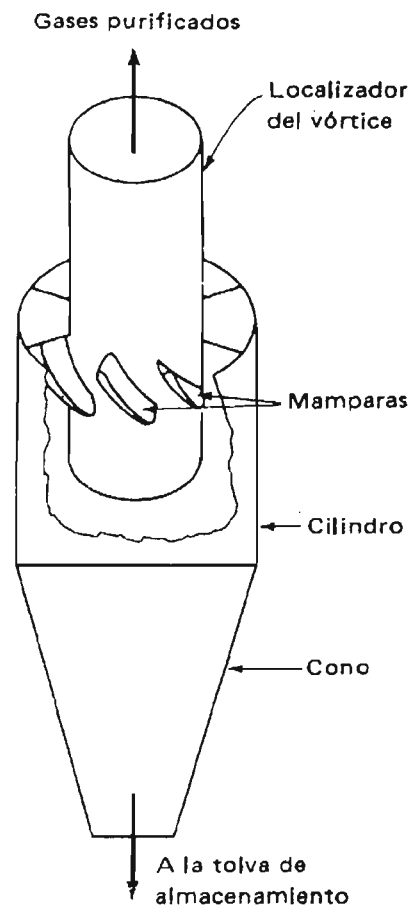


Fig. 4-2. Separador Centrifugo de mamparas axiales

En aplicaciones industriales, los ciclones son frecuentemente usados como limpiadores preliminares para equipos mas sofisticados para controlar la contaminación del aire, tal como precipitadores electrostáticos o casas de bolsas. Los ciclones son más eficientes para remover partículas que las cámaras de sedimentación, pero menos eficientes que los colectores húmedos, casas de bolsas ó precipitadores electrostáticos.

Los ciclones usados como prelimpiadores son frecuentemente diseñados para remover mas del 80% de las partículas que son mayores de 20 μm de diámetro. Las partículas pequeñas que escapan del ciclón pueden ser colectadas por equipos de control más eficientes.

Los ciclones son relativamente baratos para su construcción, puesto que ellos no tienen partes móviles. Ventiladores mueven el gas a través del sistema, pero estos son un dispositivo auxiliar. Ellos son usualmente baratos para operar.

Ciclones en serie, o bancos de pequeños ciclones en paralelo (multiciclones), pueden ser usados para remover efectivamente diámetros de partículas de aproximadamente 5 a 10 μm , las Figuras (4-3,4-4,) muestran los detalles de un multiciclón.

Cambiando los detalles en el diseño del ciclón y en las dimensiones relativas conducen a mejorar las eficiencias sin incrementar siempre los costos de operación.

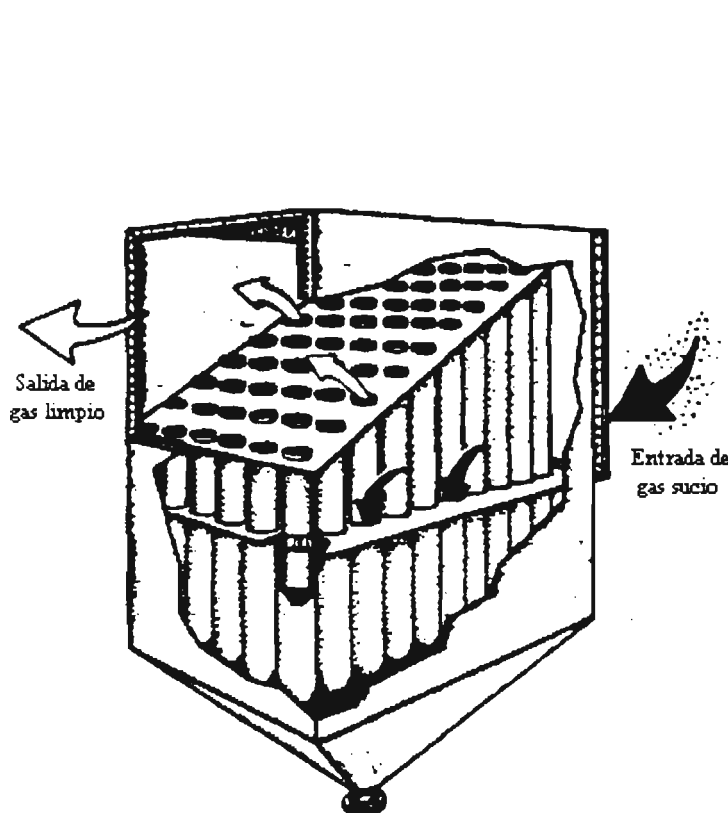


Figura 4-3. Multiciclón

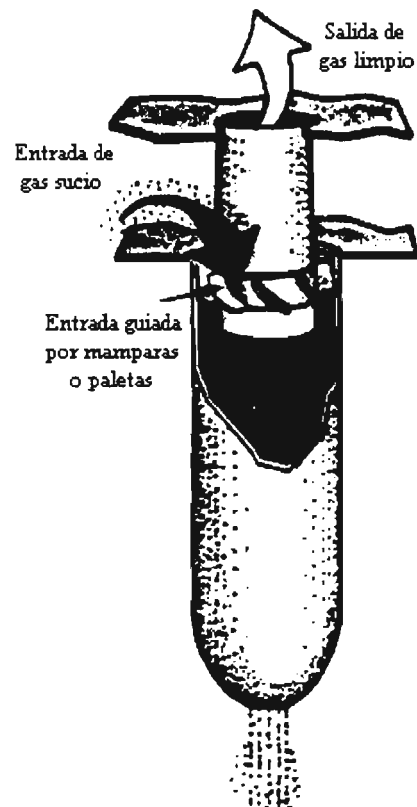


Figura 4-4. Ciclón de entrada axial

En un multiciclón, ciclones de entrada axial son arreglados en paralelo. El gas sucio entra uniformemente a través de todos los ciclones individuales. El gran número de entradas permite que pequeños ciclones de alta eficiencia sean usados sin mucho impedimento del flujo del gas de proceso.

El ciclón de entrada axial mostrado en la (Figura 4-4) se usa en arreglos de multiciclones. Aquí, la entrada del gas es paralelo a el eje del cuerpo del ciclón. El gas entra en la parte superior y es dirigido en un patrón de vórtice por las paletas que se sujetan al centro del tubo.

Esto ayuda a prevenir la turbulencia alrededor de la entrada, que puede ser un problema en los ciclones de entrada tangencial.

4.4 CONSTRUCCIÓN DEL CICLÓN

Los ciclones pueden ser diseñados en un número de maneras diferentes. El diseño más común es el ciclón de entrada tangencial ya mostrado en la (Figura 4-1), este tipo de ciclón tiene cuatro características de diseño principal: cuerpo del ciclón, sistema de descarga de polvos, y salida (Figura 4-5).

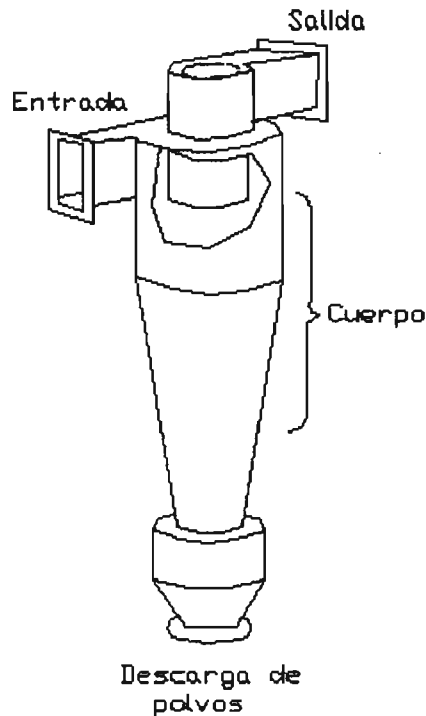


Figura 4-5. Partes que componen un ciclón

4.5 ENTRADA

Primero consideremos diferentes diseños de entrada. El gas que llega al ciclón debe ser transformado de flujo recto en un patrón circular para formar el vórtice.

Los problemas pueden aumentar en la entrada si la turbulencia se desarrolla e inhibe la formación del vórtice. Por esta razón, modificaciones de la entrada tangencial han tenido que ser usadas (Figura 4-6).

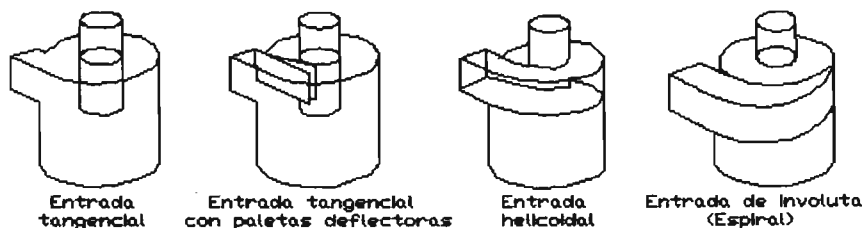


Figura 4-6. Diferentes tipos de entrada para ciclones

Las venas deflectoras en la entrada adicionadas a la entrada tangencial pueden disminuir y forzar la corriente del gas para mover contra la pared. Las entrada helicoidal y de involuta pueden ayudar proporcionando una transición suave del gas en un patrón de vórtice. El desarrollo de estas modificaciones son algunas veces marginales, aunque el incremento de eficiencias han sido reportados.

4.6 CUERPO

La eficiencia para remover partículas en un ciclón depende en gran parte en las dimensiones del ciclón. Un diseñador de ciclones debe conocer primero el flujo volumétrico a través del sistema y lo que se espera en términos de la eficiencia de remoción. La dimensión más importante es el diámetro del cuerpo.

Un ciclón grande en relación a su diámetro puede proporcionar más revoluciones en el vórtice y de este modo mayor posibilidad para la colección de las partículas. También, los ciclones de diámetro pequeño coleccionan partículas pequeñas y son más eficientes que los ciclones de diámetro grande. Los diámetros de cuerpo pequeños crean fuerzas de separación más grandes.

Ciclones menos de 0.25 m (10 in.) de diámetro son generalmente considerados por tener alta eficiencia, aunque las eficiencias pueden variar dependiendo en las dimensiones relativas del ciclón.



Figura 4-7. Cuerpo del ciclón

4.7. DESCARGA DE POLVOS

Las partículas recolectadas deben ser removidas del ciclón o estas pueden reintroducirse e incorporarse en el vórtice interno. Un número de métodos pueden usarse para remover periódicamente o continuamente el material recolectado.

Una compuerta corrediza en el fondo del cono es una de las construcciones más simples que permiten la remoción periódica. Una válvula rotatoria puede proporcionar remoción continua. Esto se muestra en la (Figura 4-8).

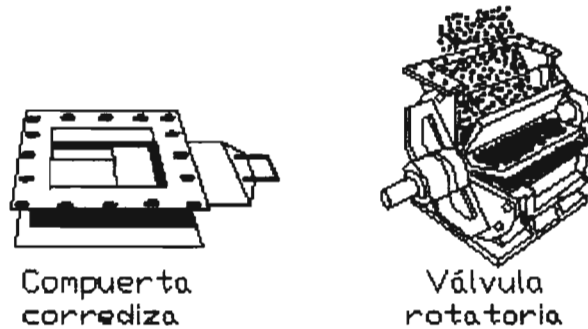


Figura 4-8. Compuerta corrediza y Válvula rotatoria para la descarga de polvos

4.8 SALIDA

Las modificaciones para las salidas del gas han sido desarrolladas en un intento para mejorar las características de operación del ciclón. El gas que sale de un ciclón puede normalmente continuar moviéndose en un patrón circular.

Si este flujo pudiera ser en línea recta sin producir turbulencia, la cantidad de energía necesaria para mover el gas a través del sistema podría ser reducida. Esto ha sido logrado para alguna magnitud por dispositivos de salida similares a estos mostrados en la (Figura 4-9).

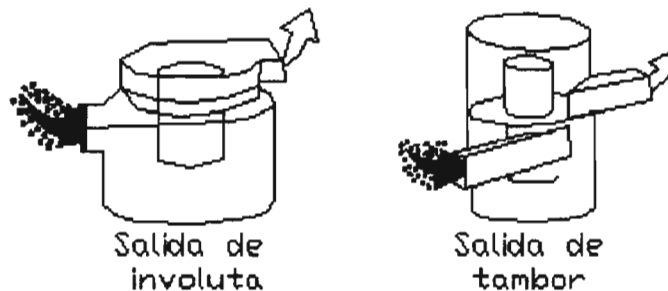


Figura 4-9. Salida de involuta y de tambor

4.9 VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

La velocidad de asentamiento de las partículas en un ciclón, se puede ser expresada por

$$V_t = \sqrt{\frac{4(\rho_p - gD_p)}{3C_D\rho}} \quad (4-1)$$

Donde

V_t = Velocidad de sedimentación, m/s

ρ_p = Densidad de la partícula, kg/m³

ρ = Densidad del fluido, kg/m³

g = Constante de gravedad, 9.806 m/s²

D_p = Diámetro de la partícula, m

C_D = Coeficiente de retardo, adimensional

$$C_D = \alpha Re^{-\beta} \quad (4-2)$$

C_D es el coeficiente de retardo o de arrastre, este coeficiente se calcula dependiendo del tipo de flujo. En la (Tabla 4-1) se presentan valores para varios regimenes de flujo presentes cuando se requiere diseñar un ciclón.

Tabla 4-1. Constantes para C_D , en función del tipo de patrón de flujo

	α	β	Re
STOKES	24	1.0	< 2
INTERMEDIA	18.5	0.6	$2 < Re < 500$
NEWTON	0.44	0	> 700

4.10 CONFIGURACIONES DE DISEÑO DE CICLONES

Para el diseño del ciclón se tienen que tomar en cuenta varios parámetros, la (Figura 4-10) muestra cada uno de los parámetros, utilizados para el diseño de un ciclón típico.

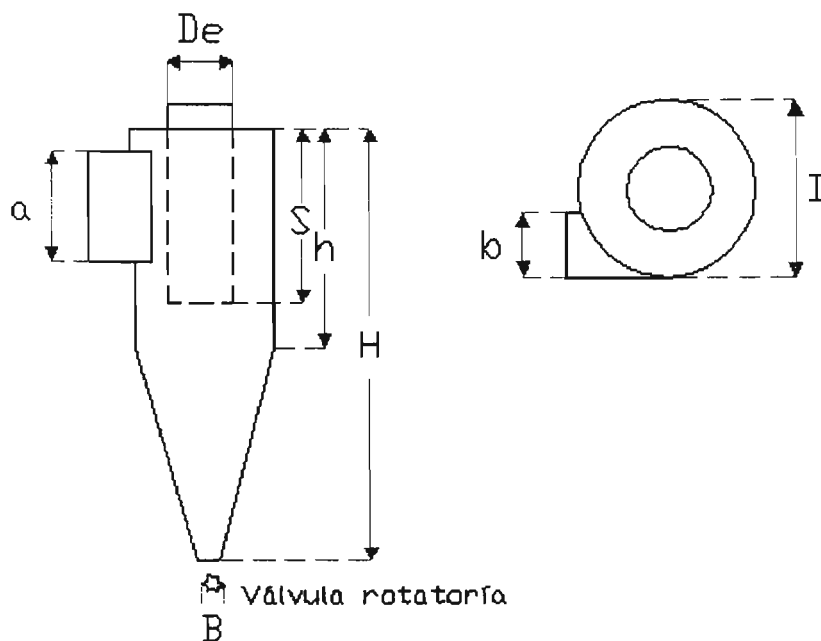


Figura 4-10. Parámetros para dimensionar un ciclón



A continuación se presenta una tabla con diferentes configuraciones para el diseño de ciclones, la cual esta dividida en ciclones de alta eficiencia y ciclones para propósitos generales para los modelos de Stairmand, Swift y Lapple.

Tabla 4-2. Configuraciones de diseño de ciclones

TÉRMINO	DESCRIPCIÓN	ALTA EFICIENCIA			PROPÓSITOS GENERALES	
		Stairmand	Swift	Lapple	Swift	P & W
D	Diámetro del cuerpo	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
a	Altura de la entrada	0.5	0.44	0.5	0.5	0.583
b	Ancho de la entrada	0.2	0.21	0.25	0.25	0.208
S	Largo ducto de salida	0.5	0.5	0.625	0.6	0.583
De	Diámetro de salida	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
h	Altura del cilindro	1.5	1.4	2.0	1.75	1.333
H	Altura total	4.0	3.9	4.0	3.75	3.17
B	Diámetro tolva	0.375	0.4	0.25	0.4	0.5
NH		6.40	9.24	8.0	8.0	7.76
Superficie		3.67	3.57	3.78	3.65	3.20

4.11 DIÁMETRO DE DISEÑO DEL CICLÓN

Existen varias ecuaciones para calcular el diámetro del ciclón, aquí se presenta una de varias ecuaciones que existe, la (Ecuación 4-3) es de tipo iterativa.

$$D = 0.0502 \left[\frac{Q\rho^2}{\mu\rho_p} \frac{1-b/D}{a/D(b/D)^{2.2}} \right]^{0.454} \quad (4-3)$$

Donde

D = Diámetro del ciclón [=] ft

Q = Flujo volumétrico [=] ft³/seg

ρ = Densidad del fluido [=] lb/ft³

ρ_p = Densidad de la partícula [=] lb/ft³

μ = Viscosidad del fluido [=] lb/ft-seg

Consideraciones:

Densidad de partícula en el intervalo de 1 g/cm³ a 2.5 g/cm³

Velocidad de entrada al equipo entre 50 y 90 ft/seg



4.12 CAÍDA DE PRESIÓN EN CICLONES

Otro parámetro de importancia para el diseño del ciclón es la caída de presión, la cual nos indica que cantidad de presión estática se debe de vencer por medio de un ventilador, para mover el gas de proceso a través del ciclón. Se presenta la (Ecuación 4-4), para llevar a cabo el cálculo de la caída de presión. Nótese que no es la única ecuación que existe en la literatura, aquí se presenta como una opción.

$$\Delta P = 0.0030 \rho U T^2 N H \quad (4-4)$$

Donde

ΔP = Es la caída de presión [=] in H₂O

ρ = Densidad del fluido [=] lb/ft³

UT = Velocidad de entrada [=] ft/seg

$$NH = 16(ab/De^2) \quad (4-5)$$

a = Altura de la entrada [=] ft

b = Ancho de la entrada [=] ft

De = Diámetro de salida [=] ft

Las constantes a, b, De, dependen del tipo de configuración que se elija, si es para ciclones de alta eficiencia o ciclones para propósitos generales (mostrados en la Tabla 4-2).



CAPÍTULO V

COLECTORES HÚMEDOS (SCRUBBERS)



CAPÍTULO V. COLECTORES HÚMEDOS (SCRUBBERS)

5.1 COLECTORES HÚMEDOS

Los colectores húmedos proporcionan un medio versátil de remover partículas y gases contaminantes de las corrientes de descarga de muchos procesos industriales. Estos dispositivos usan agua para hacer que las pequeñas partículas difíciles de colectar sean más fáciles de colectar incorporándolas en grandes gotas de agua. Los gases pueden absorberse por virtud de su solubilidad en agua o agregando componentes químicos al agua.

Los colectores húmedos pueden ser construidos en todos los tamaños. Ellos pueden ser bastante pequeños, para alojar bajos flujos volumétricos de gas de pequeños procesos químicos, o ellos pueden diseñarse bastante grandes, para remover gases tal como el dióxido de azufre de las calderas de carbón para generar energía.

Los colectores húmedos pueden alcanzar un amplio rango de eficiencias para la remoción de partículas o gases. Una multitud de diferentes tipos de colectores están comercialmente disponibles. Para remover partículas, un parámetro de diseño muy importante es la entrada de energía en el colector, o caída de presión a través del colector.

Generalmente, si más energía se usa para que funcione un colector, más partículas deben ser removidas. Por otra parte, los colectores húmedos se construyen para remover los gases contaminantes como el SO_2 , NO , o HCl , dependiendo que es lo más importante en el diseño mecánico y químico, y no tanto en la caída de presión a través del colector.

La versatilidad de los colectores no viene sin los problemas. Los requerimientos para altas eficiencias para remover gases o partículas conducen a un alto costo de operación. Los subproductos son difíciles de recuperar y un problema de contaminación del aire puede transformarse rápidamente en un problema de contaminación de agua.

Para la remoción de partículas, los colectores húmedos son más efectivos que las cámaras de sedimentación o ciclones, pero generalmente menos eficientes que las casas de bolsas o los precipitadores electrostáticos a menos que operen a altas caídas de presión. Los colectores húmedos proporcionan una alternativa a la incineración, o dispositivos de adsorción o de condensación, si los gases contaminantes son solubles o pueden hacerse reaccionar con compuestos químicos en el líquido depurador.

5.2 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

Hay dos principios de mecanismos de colección para el colector húmedo. El primero es la *impacción inercial*. Cuando las gotas se introducen en la corriente de gas, las partículas que se mueven no pueden evitar impactarlas.

Debido a su inercia, las partículas no pueden seguir las líneas de flujo alrededor de las gotas (Figura 5-1) y como resultado, impacta en la gota. Las partículas son atrapadas en gotas más grandes las cuales permiten ser colectadas más fácilmente.

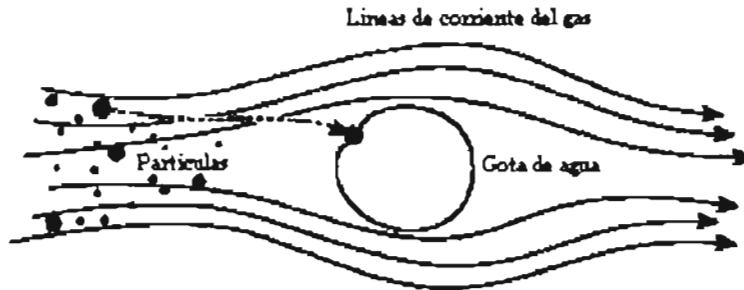


Figura 5-1. Impactación inercial.

Las partículas muy pequeñas también pueden ser recolectadas por el mecanismo de difusión. Las partículas son continuamente bombardeadas por moléculas de gas cuando ellas se mueven en una corriente de gases.

Este bombardeo puede causar que se muevan primero de una manera y después de otra manera al azar (se difunden a través del gas). Este movimiento al azar puede eventualmente causar que las partículas choquen con una gota de agua y puedan ser colectadas (Figura 5-2).



Figura 5-2. Difusión

Los sistemas colectores húmedos deben ser proporcionados para dos operaciones, para remover el contaminante. Uno es el proceso de conducir el contaminante (partículas o gases contaminantes) en contacto con el líquido.

La otra operación es remover el líquido de la corriente de gas (Figura 5-3). La remoción del líquido puede parecer al principio relativamente simple, pero las pequeñas gotas de agua pueden ser difíciles de separar del gas.



Figura 5-3. Contacto y separación

Se han desarrollado muchas expresiones matemáticas para ayudar a diseñar y describir el rendimiento de los sistemas colectores. Para la colección de la partícula, un concepto básico ha sido muy usado. Este es el concepto de energía de contacto, y establece:

"Cuando se compara el mismo consumo de energía, todos los colectores dan substancialmente el mismo grado de colección de un polvo disperso dado, sin tener en cuenta el mecanismo implicado y sin tener en cuenta si la caída de presión es obtenida por altas velocidades de flujo de gas o altas velocidades de flujo de agua."

En otras palabras, tu pagas por lo que tu obtienes. Cuando más energía se aplica, más partículas son removidas, suponiendo que la energía se aplica eficazmente. Hay, sin embargo, excepciones a esta generalización.

5.3 DISPOSITIVOS PARA COLECTORES HÚMEDOS

Los colectores húmedos se construyen en todas las formas y tamaños. Ellos pueden variar de una simple cámara adaptada con boquillas de aspersión a sistemas complicados que usan deflectores, motores, aspersores, y otros dispositivos.

Un método para clasificar a los sistemas colectores húmedos es por la manera en la cual el contacto se lleva a cabo entre la corriente del gas y el agua.

Por ejemplo, los colector de aspersión envían agua a alta presión a través de las boquillas para generar las gotas que bombardean partículas del polvo que entran. Aquí, la energía se aplica para forzar a que el agua pase través de las boquillas.

Pueden usarse cuatro categorías para clasificar a los colectores húmedos en esta manera (Figura 5-4). Removiendo los contaminantes los colectores húmedos pueden usar la energía de la corriente líquida, la corriente de gas, un rotor impulsado mecánicamente, o una combinación de estos métodos.



Figura 5-4. Fuentes de energía

En la tabla (Tabla 5-1) se muestran las aplicaciones de las fuentes de energía para los diferentes tipos de colectores húmedos que existen.

Tabla 5-1. Categorías de los colectores húmedos

Fuente de energía	Dispositivos
Colectores de aspersión	Corriente de líquido
Colectores Venturi, orificio	Corriente de gas
Colector de rotor de aspersión vertical	Rotor mecánico
Colectores de lecho móvil, empacados	Combinación

Los componentes usados para construir los colectores húmedos están limitados en número. El diseñador de los sistemas colectores puede utilizar solamente uno o varias de las características de diseño listadas abajo:

Boquillas de aspersión

Gargantas de Venturi

Superficies de choque

- Placas
- Deflectores
- Empaques

Orificios que inducen la aspersión

Aperturas ciclónicas

Rotores impulsados mecánicamente

Las combinaciones posibles entre estos artículos ha conducido a muchos colectores a disponerse comercialmente.

5.4 TORRES DE ASPERSIÓN

Las torres de aspersión son simples en su diseño y construcción. Ellas generalmente consisten de una cámara cilíndrica o rectangular con uno o más niveles de boquillas de aspersión como se muestra en la (Figura 5.5).

Las boquillas producen gotas que lanzan en la cámara, para impactar las partículas o para absorber gases contenidos en la corriente del gas contaminado.

El flujo generalmente es a contracorriente, como se muestra en la (Figura 5-5). Es decir, la dirección de flujo de gas es opuesta a la dirección del flujo del líquido.

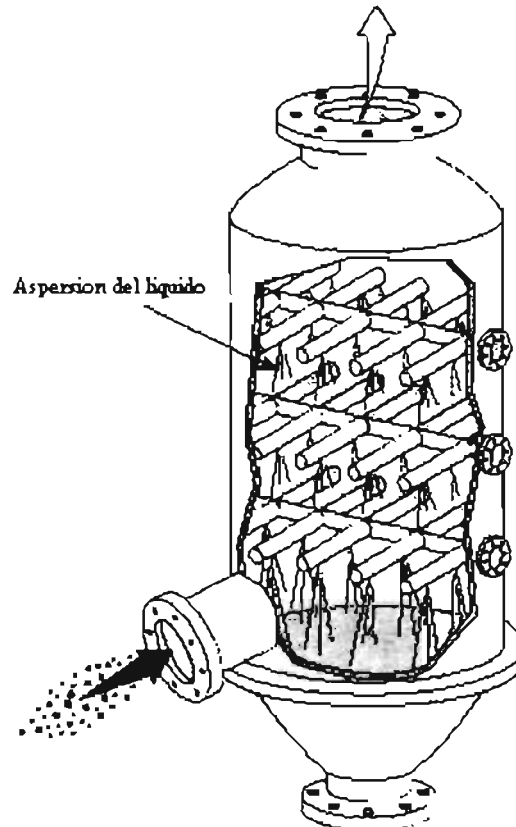


Figura 5-5. Torre de aspersión

Pueden usarse varios tipos diferentes de boquillas de aspersión (Figura 5-6). En la boquilla de choque, el líquido a alta presión choca con una placa o perno para dar una aspersión de las gotas de tamaño uniforme.

La forma helicoidal de la boquilla de cono sólida puede proporcionar una aspersión muy grande y puede estar menos sujeta a taponarse la boquilla de choque.

Los requisitos de energía principales de las torres de aspersión vienen de la necesidad de forzar el líquido a través de la boquilla a alta presión, para que las gotas finas puedan ser producidas.

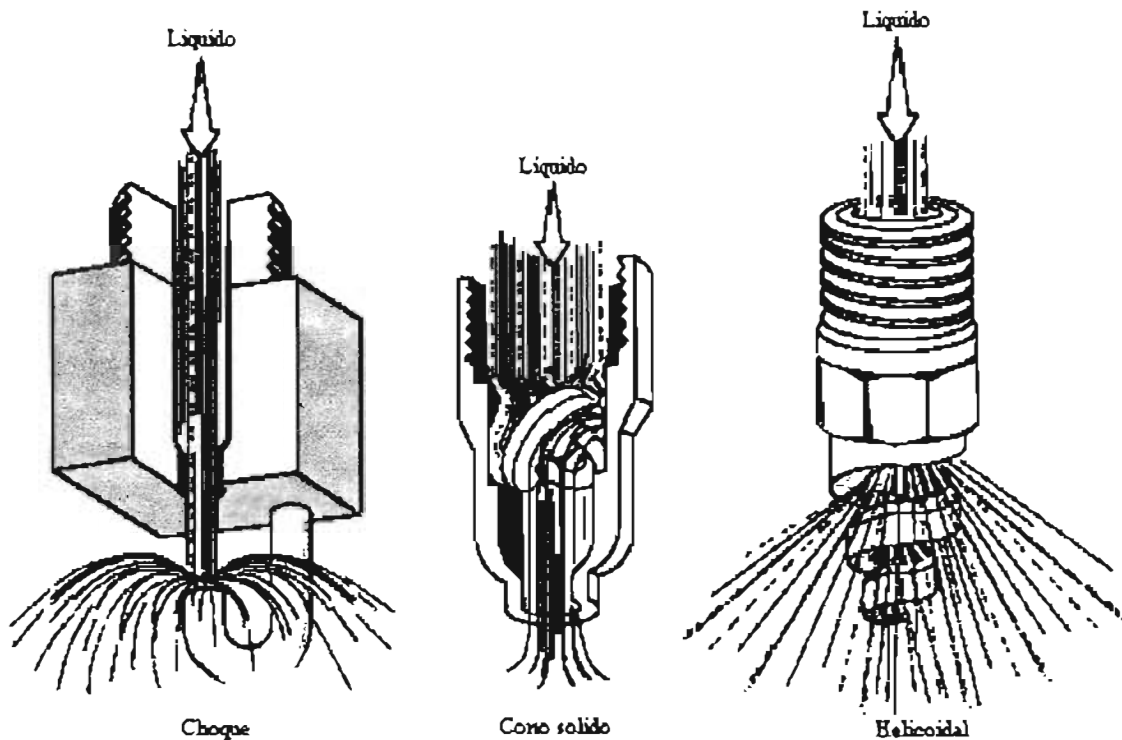


Figura 5-6. Boquillas de aspersión.

Pueden usarse torres de aspersión eficazmente para la absorción de gases, si el gas del contaminante es altamente soluble. Por ejemplo, se usan torres de aspersión para remover gases de HCl de la descarga final de la fabricación del ácido clorhídrico.

Las torres de aspersión son adecuadas para la colección de partículas gruesas mayores que 10 a 25 μm en diámetro. Pueden coleccionarse partículas de tamaño pequeñas si la presión de la boquilla de entrada para el líquido se aumenta.

5.5 COLECTORES VENTURI

El colector venturi proporciona un medio de usar la energía de una corriente de gas que se mueve para atomizar el líquido en gotas. En el venturi, el gas es forzado a través de una restricción el cual reduce el flujo del gas (Figura 5.7).

Para obtener esto en la parte estrecha del dispositivo, el gas debe moverse a una velocidad relativamente más alta. Si se introduce agua en esta garganta estrecha, la velocidad alta del gas puede cortar el agua en gotas.

Estas gotas sirven entonces como blanco para la colección de las partículas.

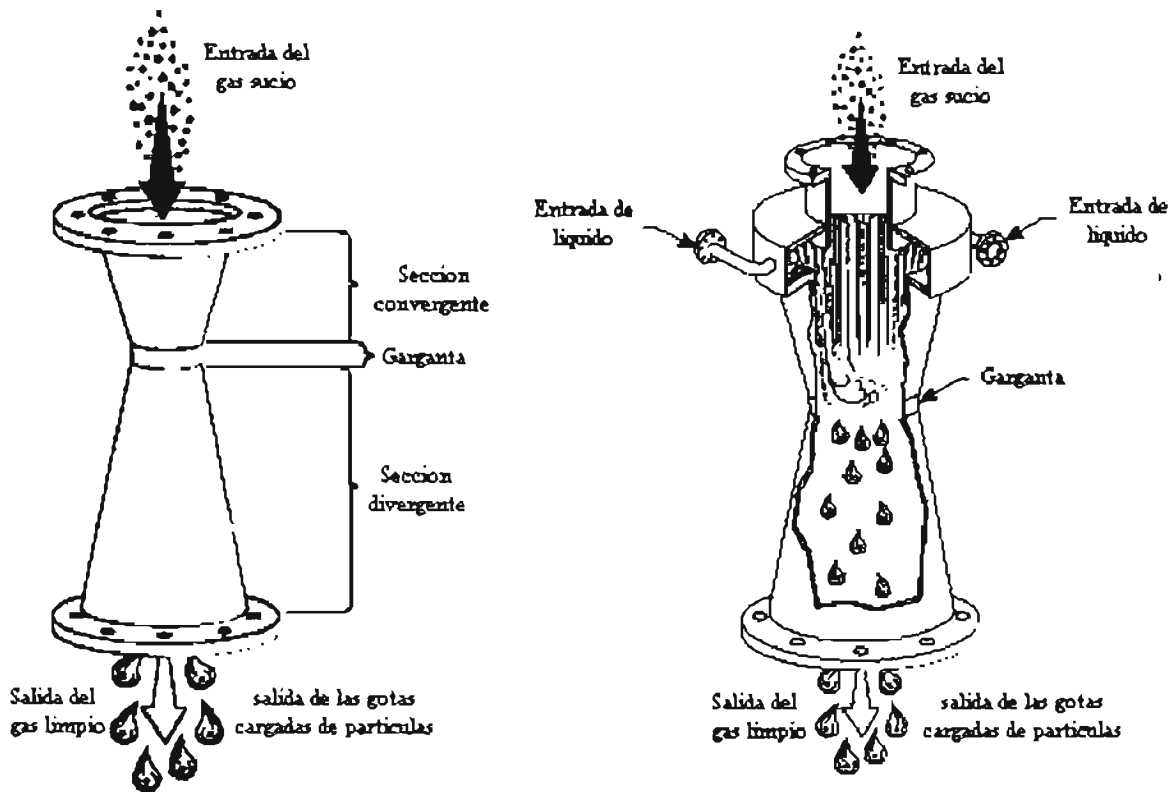


Figura 5-7. Colector venturi.

Los colectores venturi pueden tener la mayor eficiencia de colección de partículas de cualquiera sistema de colección húmedo.

La caída de presión del gas a través del dispositivo puede ir de 2 a 40 cm de agua (5 a 100 in de agua) en sistemas comerciales, aunque caídas de presión de 8 a 24 cm de agua (20 a 60 in de agua) son más comunes.

La velocidad del gas en la garganta puede ir de 30 a 250 m/s (100 a 800 ft/seg) como resultado de la diferencia de presión a través de la garganta. Operando a una caída de presión alta, un venturi puede remover partículas menores que 0.5 μm de diámetro.

El venturi es meramente un sistema diseñado para usar la energía en la corriente de gas para atomizar el líquido. Las gotas de agua que incorporan partículas deben ser colectadas después de salir del venturi.

Un separador ciclónico en el fondo con entrada grande se usa a menudo para este propósito (Figura 5-8).

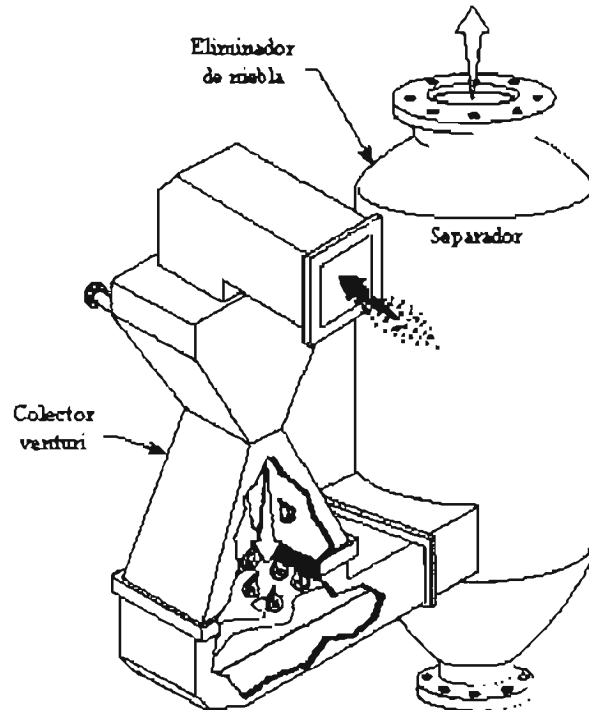


Figura 5-8. Colector Venturi con entrada en el fondo para separador ciclónico.

Los eliminadores de niebla son a menudo incluidos en sistemas colectores húmedos para remover gotas de líquido antes de que el gas entre en la atmósfera. La (Figura 5-9.) muestra ejemplos de eliminadores de niebla de malla de alambre y de rejilla. Las gotas chocan en sus superficies y drenan (debido a la gravedad) para su colección.

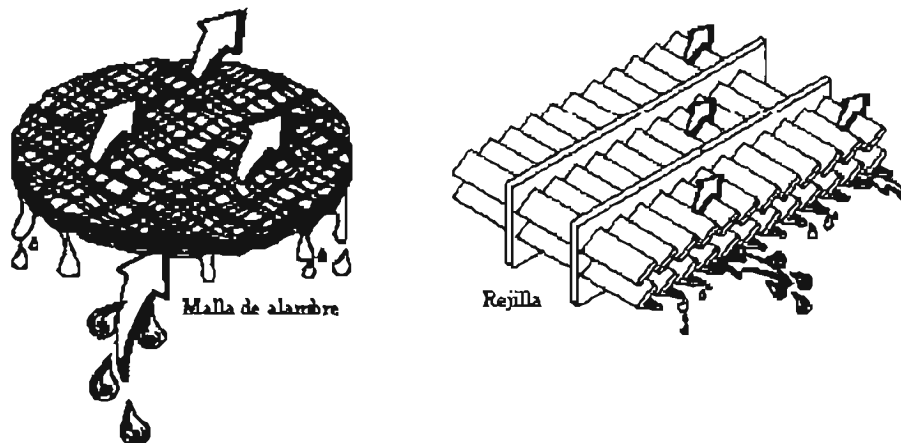


Figura 5-9. Eliminadores de niebla

Los colectores venturi también pueden usarse para la absorción de gases contaminantes. El corto tiempo que el gas está en contacto con el líquido, de cualquier manera, limita la eficiencia de colección del dispositivo para gases. Para la colección de partículas, incrementando la energía de la entrada incrementa la eficiencia de colección en el venturi.

Para la absorción de gas, un aumento en la caída presión disminuye el tiempo de residencia, normalmente permitiendo menos tiempo para la absorción.

Los colectores venturi han sido usados con éxito en plantas de energía para remover cenizas volantes y SO_2 . Hay muchas variaciones para el diseño de un venturi.

Se han construido sistemas donde el agua es espreada en la garganta (Figura 5-10), donde el tamaño de la garganta puede ajustarse para adaptar flujos de gases variables (Figura 5-11), o donde una serie de varillas colocadas muy cerca una de otra, da una serie de pequeñas gargantas en el venturi (Figura 5-12).

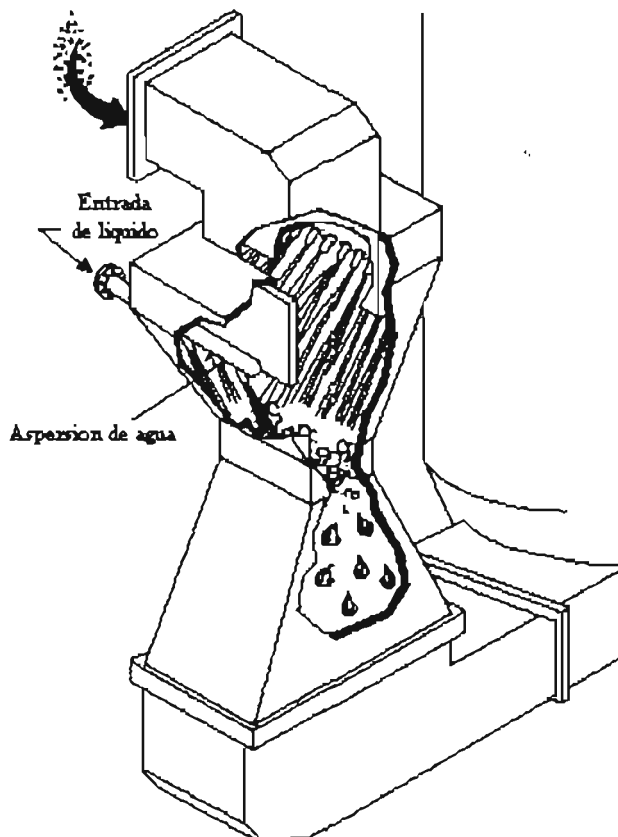


Figura 5-10. Venturi de aspersión.

5.6 COLECTORES DE ORIFICIO

Otro método de utilizar la energía de la corriente del gas es diseñar un sistema en el cual el gas del proceso se force a través de un depósito de líquido. El gas se mueve a través de un pasaje restringido o orificio para atomizar el agua. Las partículas grandes en el gas que entra, chocan con la superficie del lecho del líquido y son recolectadas. Las partículas más pequeñas impactan en las gotas producidas por la alta velocidad del gas rozando por encima de la superficie del agua.

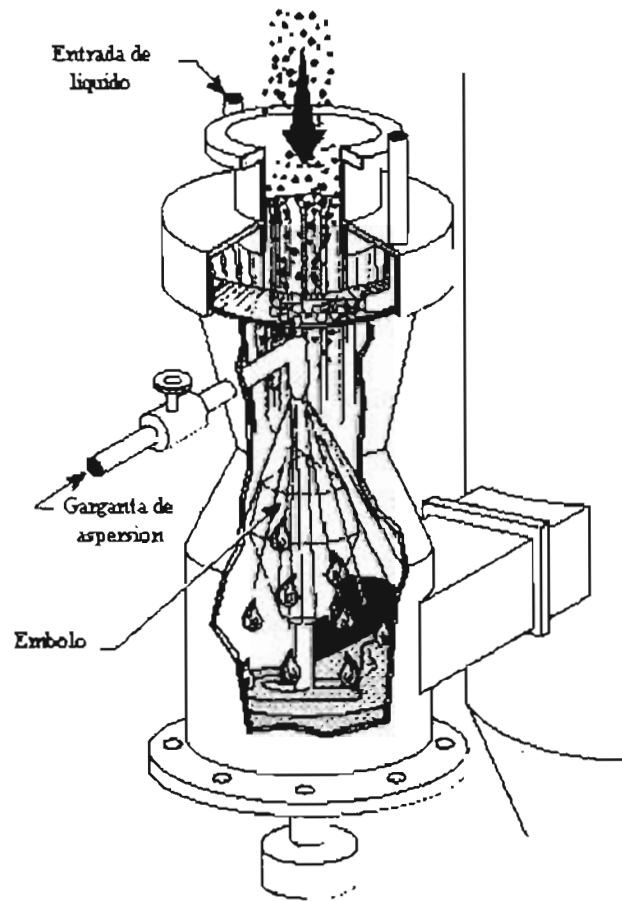


Figura 5-11. Venturi de garganta ajustable

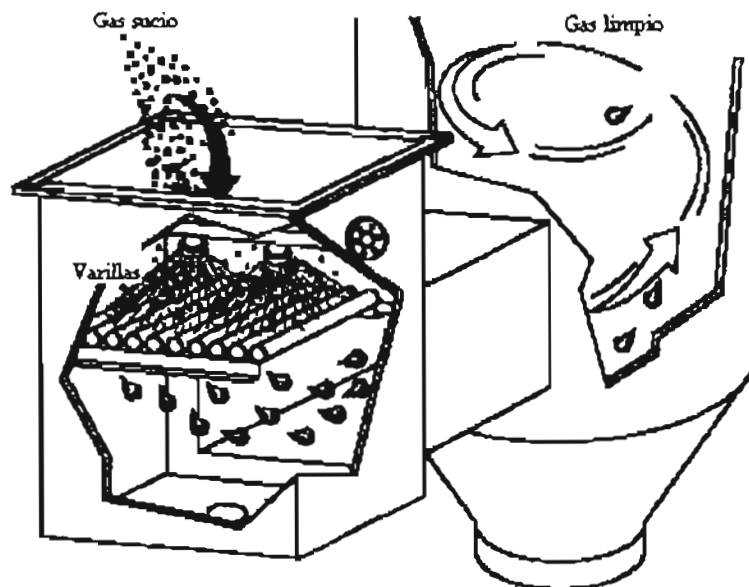


Figura 5-12. Venturi de varillas.

En el colector de orificio mostrado en la (Figura 5.13), los deflectores sirven como superficies de impacto para la colección de las gotas. Las gotas caen al fondo del colector y las partículas sedimentan fuera para formar un lodo que debe ser periódicamente removido.

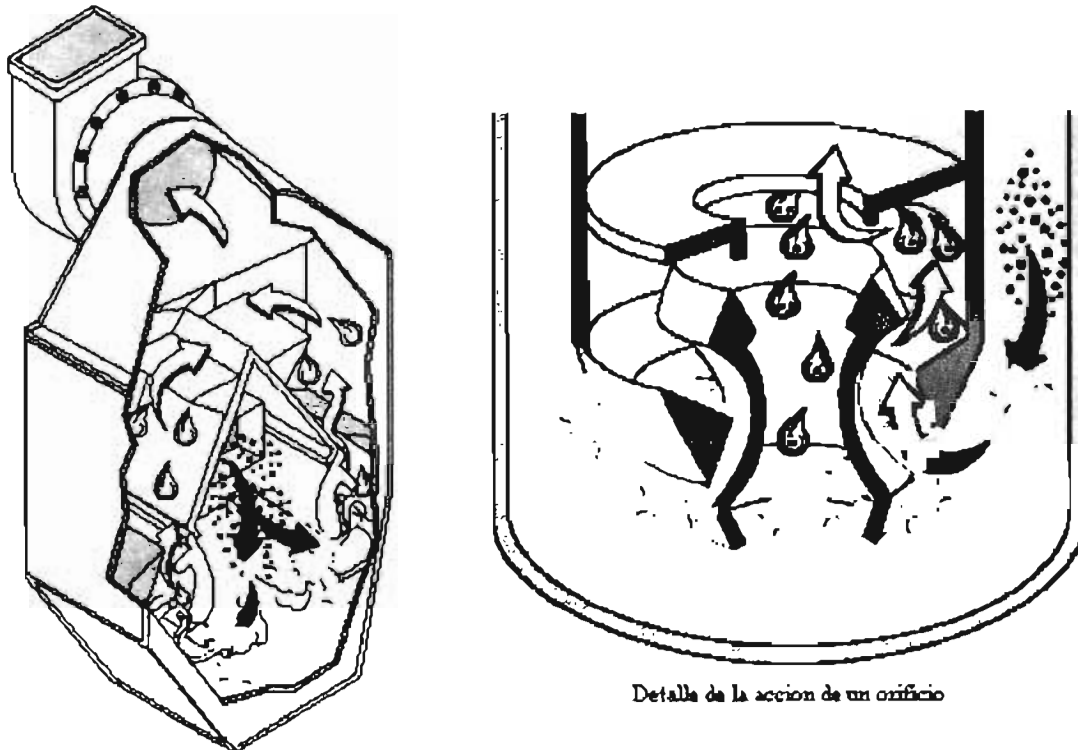


Figura 5-13. Colector de orificio.

Se usan colectores de orificio principalmente para la colección de partículas, especialmente pegajosas o materiales aglomerados. Como un dispositivo de caída de presión media, ellos tienen una eficiencia de colección moderada para las partículas alrededor de $1 \mu\text{m}$ de diámetro (mayor que el 50% de eficiencia).

5.7 COLECTORES DE LECHO MÓVIL

Un dispositivo que usa energía de la corriente del líquido, y de la corriente del gas es el colector de lecho móvil. Como se muestra en la Figura 5-14, el gas del proceso se inyecta en el fondo del dispositivo, manteniendo un lecho de esferas de plástico en constante movimiento. El agua es espreada de las boquillas sobre estas esferas móviles. Las partículas en la corriente del gas pueden impactar en el líquido cubriendo las esferas, o las gotas se dirigen abajo de la boquilla de aspersión. El gas también atomiza el líquido que circula dentro del lecho móvil para proporcionar mas oportunidad para la colección de partículas. El movimiento continuo del lecho, combinado con el efecto de lavado del agua espreada minimiza el taponamiento para la colección de partículas.

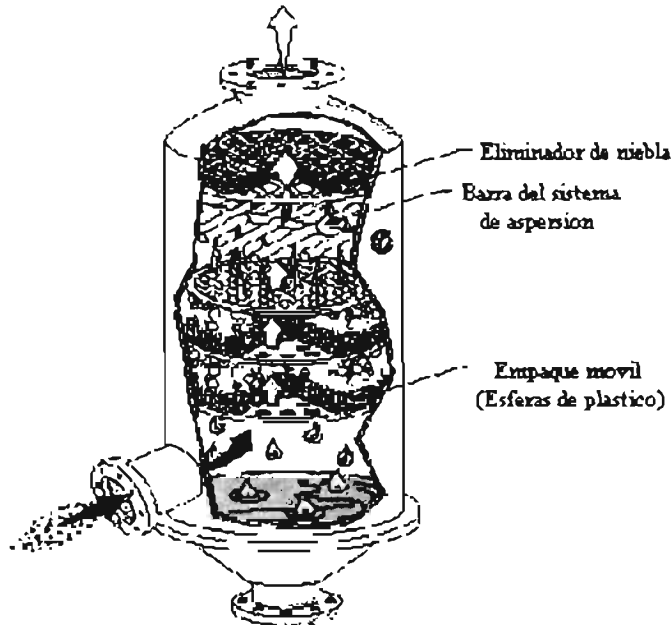


Figura 5-14. Lecho móvil.

Estos sistemas también pueden usarse para absorción de gas y se han usado para quitar ambas partículas y SO_2 de las descargas de las plantas de energía.

5.8 COLECTOR DE ROTOR DE ASPERSIÓN VERTICAL

Un ejemplo de un colector húmedo que opera por medios mecánicos es el de rotor de (aspersión) vertical (Figura 5.15). Aquí un rotor sumergido se mueve en el depósito del líquido, el cual produce una aspersión de gotas finas. El gas pasa a través del líquido espreado y las partículas son colectadas.

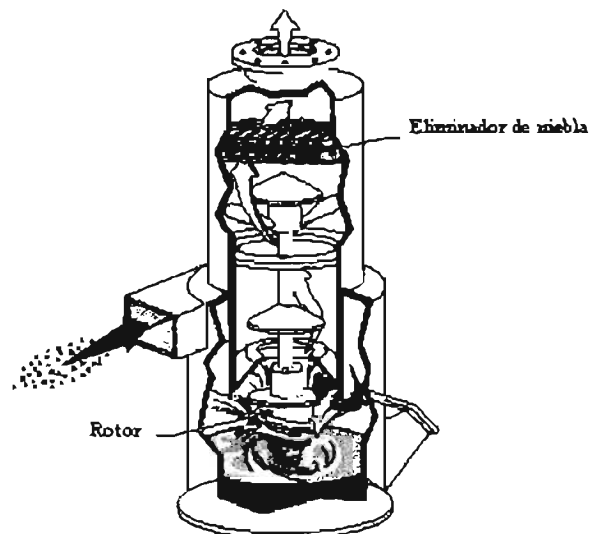


Figura 5-15. Rotor de aspersión vertical.

5.9 TORRES EMPACADAS

La torre empacada o columna empacada se usa a menudo para la absorción de gas. En estos sistemas, especialmente se diseñan con materiales de empaque los cuales se colocan en el colector. El líquido es esreado en el empaque y permite fluir a través del sistema.

Como resultado, una película de líquido cubre el material, proporcionando un área de superficie grande para que el gas entre en contacto con el líquido. Un área de superficie líquida grande incrementa las posibilidades de que los gases contaminantes sean absorbidos.

Las partículas ($> 3 \mu\text{m}$ de diámetro) en la corriente de gas también pueden ser colectadas eficazmente, pero ellos pueden tapar rápidamente los pequeños pasajes entre el empaque y pueden hacer el sistema entero sea inoperante. Se muestran varios tipos comunes de material de empaque en la (Figura 5-16). Ellos pueden hacerse de plástico, metal, o cerámica.

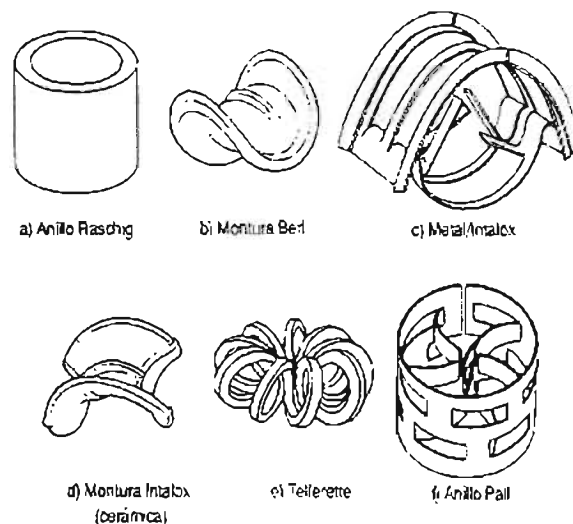


Figura 5-16. Materiales de empaque

La (Figura 5-17) muestras una torre empacada típica. Este arreglo de flujo normalmente se refiere como flujo a contracorriente. Aquí los flujos de líquidos bajan a través de las columnas y la corriente de gas se trata cuando el flujo asciende.

El dispositivo de flujo a contracorriente ahora es bastante efectivo para remover gases contaminantes puesto que el gas limpio hace contacto con el licor por todas partes en la torre (esto maximiza la solubilidad del contaminante).

Otros factores que son importantes en la remoción de los gases en estos sistemas son el diámetro de la torre, altura del empaque, velocidades de flujo del líquido y de gas, y la composición de salida del licor que purifica.

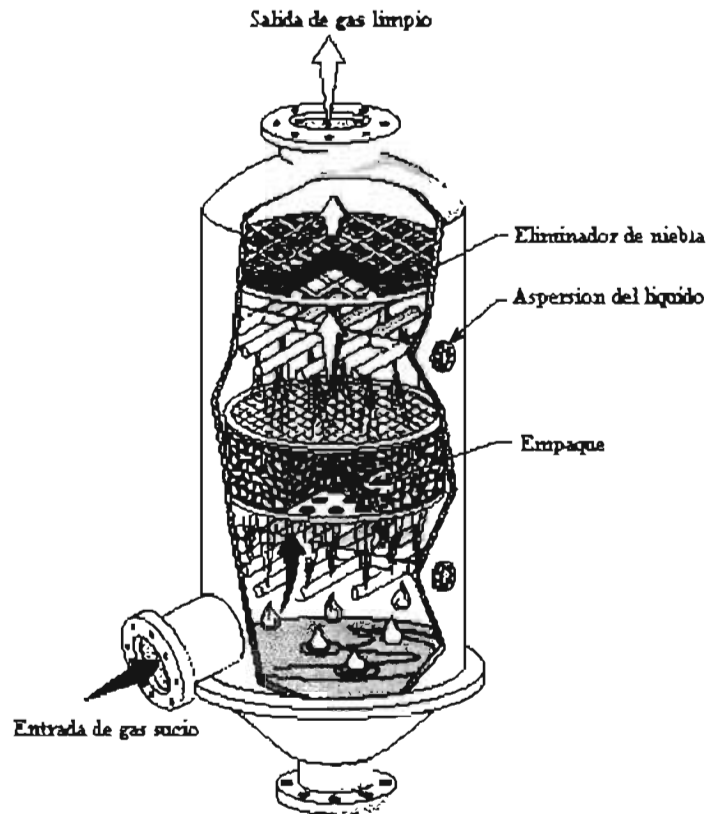


Figura 5-17. Torre empacada.

5.10 EFICIENCIA EN LAVADORES

La eficiencia en los colectores puede ser calculada por la ecuación (5-1.)

$$\epsilon = 1 - e^{-N} \quad (5-1)$$

$$N = \alpha PT^{\beta}$$

$$PT = PG + PL$$

$$PG = 0.157 \Delta P G$$

$$PL = 0.583 \Delta PL (QL / QG)$$

Donde:

ϵ = Eficiencia másica

N = Número de transferencia.

PT = Energía de contacto [=] HP / (1000 cfm)

PG = Energía disipada por el gas [=] HP cfm

PL = Energía disipada por el líquido [=] HP cfm



ΔP_g = Caída de presión en el gas [=] pulg. C.A.

ΔP_L = Caída de presión en el líquido [=] lb/pulg

QL = Flujo de agua [=] gal/min.

QG = Flujo de gas [=] cfm

α, β = Coeficientes experimentales que dependen del tipo y geometría del colector.

5.11 CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LOS COLECTORES HÚMEDOS

A continuación se presentan varias tablas mostrando las características de operación de cada colector húmedo mencionado anteriormente.

Tabla 5-2. Características de operación de las torres de aspersión.

Presión de la Gota (ΔP)	Relación gas/líquido (L/G)	Presión de entrada del líquido (P_L)	Diámetro de corte ($(d_p)_{\text{corte}}$)	Aplicaciones
(0.5-3.0 in de H ₂ O)	0.5-2.0 gpm/1000 ft ³ /min, 0.5-5.0 (normal), y > 10 (cuando se usa aerosol presurizado)	10-400 psig	2-8 μm	Minería Procesos químicos Incineradores y calderas Industria del hierro y el acero

Tabla 5-3. Características de operación de los colectores venturi.

Presión de la Gota (ΔP)	Relación gas/líquido (L/G)	Presión de entrada del líquido (P_L)	Diámetro de corte ($(d_p)_{\text{corte}}$)	Aplicaciones
(5-100 in de H ₂ O) (usual 20-60)	3-20 gpm/1000 ft ³ /min, (usual 7-8)	< 1-15 psig	0.2 μm (depende de ΔP)	Industria de pulpa y papel Plantas de ácido Minería Secadores Industria de metales no ferrosos Industria del hierro y el acero Calderas industriales Industria química

Tabla 5-4. Características de operación de los colectores de orificio.

Presión de la Gota (ΔP)	Relación gas/líquido (L/G)	Presión de entrada del líquido (P_L)	Diámetro de corte ($(d_p)_{\text{corte}}$)	Aplicaciones
(2-10 in de H ₂ O) (usual 20-60)	10-40 gpm/1000 ft ³ /min, 0.5-5 gpm/1000 ft ³ /min, con recirculación	No se aplica	0.8-1 μm	Minería Industrias de mineral y roca Fundidoras Industria de pulpa y papel Procesos químicos indust.



Tabla 5-5. Características de operación de los colectores de lecho móvil.

Presión de la Gota (ΔP)	Relación gas/líquido (L/G)	Presión de entrada del líquido (P_L)	Diámetro de corte ($(d_p)_{\text{corte}}$)	Aplicaciones
(3-5 in de H_2O)	3-5 gpm/1000 ft^3/min	-	2-3 μm	Minería Molinos Evaporadores Industria alimenticia

Tabla 5-6. Características de operación de las lavadores con ayuda mecánica.

Presión de la Gota (ΔP)	Relación gas/líquido (L/G)	Presión de entrada del líquido (P_L)	Diámetro de corte ($(d_p)_{\text{corte}}$)	Aplicaciones
(4-8 in de H_2O)	0.5-1.5 gpm/1000 ft^3/min (centrifugo) 4-5 rotor de aspersión	20-60 psig (centrifugo)	> 1.5 μm depende del tamaño de empaque	Minería Industria alimenticia Industria química Fundidoras y molinos de acero

Tabla 5-7. Características de operación de las torres empacadas (película húmeda).

Presión de la Gota (ΔP)	Relación gas/líquido (L/G)	Presión de entrada del líquido (P_L)	Diámetro de corte ($(d_p)_{\text{corte}}$)	Aplicaciones
(1.5-10 in de H_2O) (dependiendo de la profundidad del empaque)	1-15 gpm/1000 ft^3/min , (depende del tipo de flujo y del empaque)	5-15 psig	> 1.5 μm (depende del tamaño del empaque)	Usados principalmente para la remoción de aerosoles líquidos o gases contaminantes Operaciones metalúrgicas Plantas de ácido Procesos químicos indust.



CAPÍTULO VI

FILTROS DE TELA (CASAS DE BOLSAS)

CAPÍTULO VI. FILTROS DE TELA (CASAS DE BOLSAS)

6.1 FILTROS DE TELA

La filtración por medio de tela es una de la técnica más común para coleccionar la materia en forma de partícula. Los sistemas de filtración de tela usan un material filtrante tal como nylon o lana para remover partículas de las descargas de gases industriales. Las partículas se retienen en el material de la tela, mientras que el gas limpio pasa a través del material.

Las partículas coleccionadas son después removidas del filtro de tela por un mecanismo de limpieza: por agitación mecánica o usando pulsos de aire. Las partículas removidas son almacenadas en una tolva de colección hasta que ellas estén para su disposición o se reusen en el proceso.

6.2 DISEÑO

Los filtros de tela usados en la industria normalmente se llaman casas de bolsas. Una casa de bolsas consiste de los siguientes componentes:

- Medio filtrante y soporte
- Dispositivo de limpieza del filtro
- Tolva de colección
- Coraza o Carcasa

La superficie de colección de partículas está compuesta del material filtrante y una estructura de soporte. La mayoría de los diseños de las casas de bolsas usan tubos cilíndricos largos que contienen tela de fieltro o entretejida como medio filtrante. La tela puede soportarse por la parte superior e inferior de la bolsa a través de aros o abrazaderas de metal, o por una jaula interna que soporta la bolsa entera (Figura 6-1). El polvo es coleccionado en el interior o exterior del material de la tela dependiendo del diseño de la casa de bolsas.

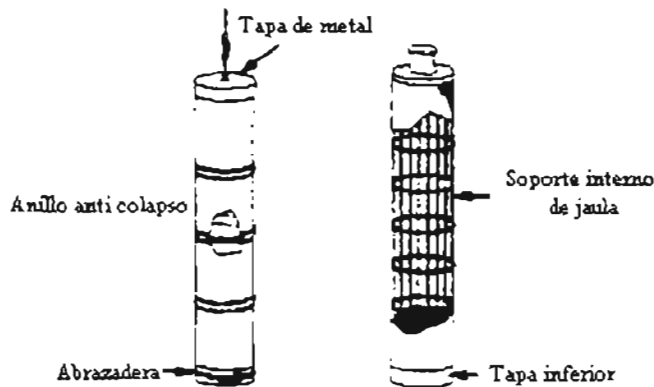


Figura 6-1. Bolsas y soporte

Algunos diseños de casas de bolsas usan una envoltura adaptada al filtro como se muestra en la (Figura 6-2). La envoltura del filtro consiste de tela de fieltro o entretejida soportada por un metal que retiene la jaula. La jaula de metal mantiene la tela rígida cuando el polvo pasa a través del filtro y se colecta por fuera del material. El aire limpio pasa por fuera del extremo abierto de la envoltura.

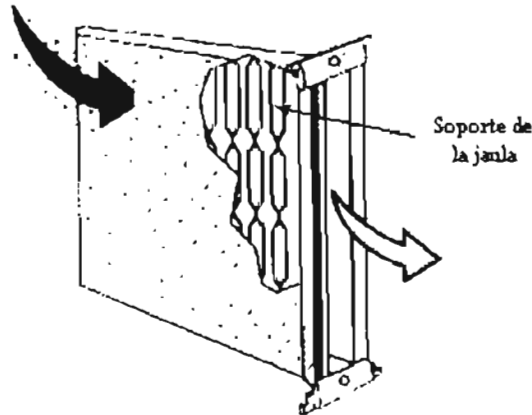


Figura 6-2. Filtro de envoltura.

Recientemente, se han usado filtros de cartucho para filtrar partículas de pequeños procesos industriales. Los filtros de cartucho son similares a los filtros de limpieza de aire que se utilizan para los camiones de transporte y son de aproximadamente de 0.61 m (1.86 ft) de largo (Figura 6-3). El polvo es colectado por fuera del cartucho mientras el flujo de aire limpio sale a través del centro del cartucho.

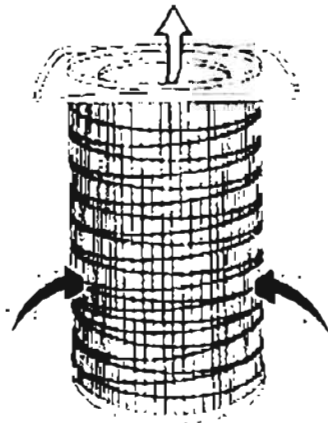


Figura 6-3. Filtro de cartucho

6.3 CASAS DE BOLSAS

Las casas de bolsas se construyen normalmente usando muchas bolsas cilíndricas que se cuelgan verticalmente en la casa de bolsas (Figura 6-4). El número de bolsas puede variar de unas centenas a miles o más dependiendo del tamaño de la casa de bolsas. Cuando las capas de polvo se han formado de un espesor suficiente, la bolsa se limpia, causando que las partículas de polvo caigan en una tolva de colección.

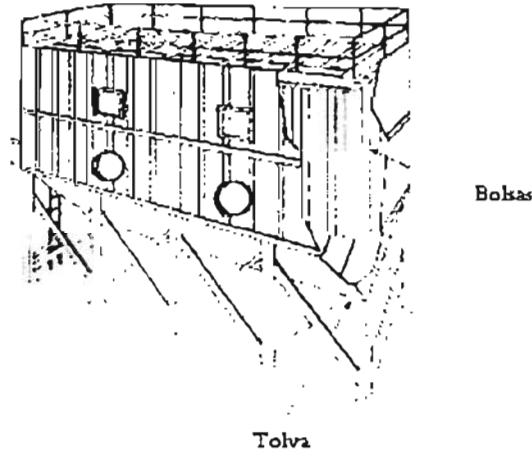


Figura 6-4. Casa de bolsas típica.

Las bolsas pueden limpiarse a través de varios métodos. Las partículas se almacenan en la tolva y son normalmente removidas por un transportador neumático o de tornillo. La casa de bolsas se envuelve a través de una hoja de metal para contener el polvo colectado y proteger las bolsas de las condiciones medioambientales atmosféricas.

La casa de bolsas de envoltura consiste en compartimientos que contienen envolturas de tela que están montadas en marcos y sujetas a las paredes del colector (Figura 6-5).

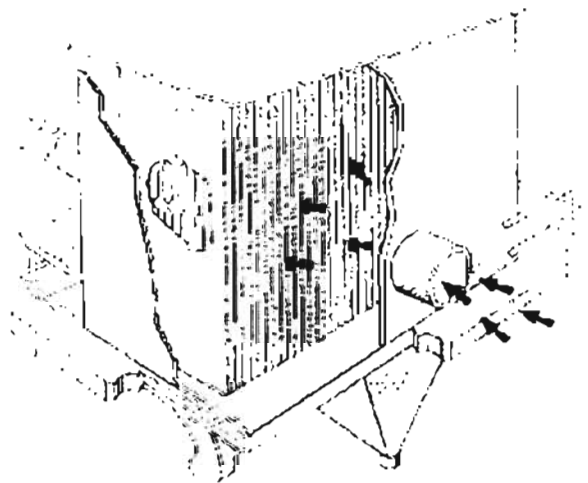


Figura 6-5. Casa de bolsas de envolturas

Los sistemas de cartucho (Figura 6-6) operan similarmente como las casas de bolsas que usan bolsas con tubos. Los cartuchos normalmente se usan en pequeños procesos industriales, estos manejan velocidades de flujo de descarga de menos de $1416 \text{ m}^3/\text{min}$ (50,000 cfm).

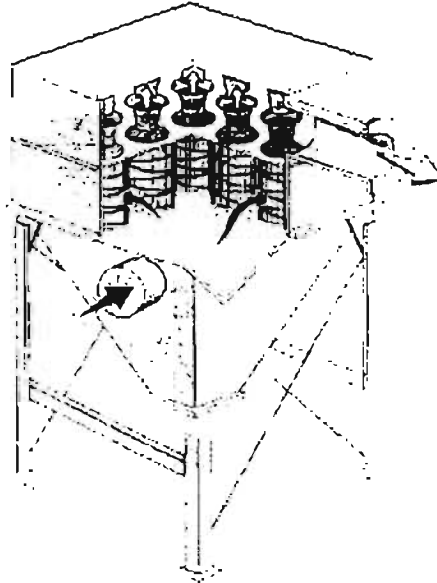


Figura 6-6. Casa de bolsas de cartuchos

6.4 DISEÑOS PARA LA FILTRACIÓN

Hay dos diseños de filtración usados en las casas de bolsas: la filtración interior y la filtración exterior. En las casas de bolsas que usan filtración interior, las partículas son recolectadas dentro de la bolsa. El gas cargado de polvo entra a través del fondo del colector y es dirigido dentro de la bolsa por mamparas difusoras o deflectores y también por una placa de celda. La placa de celda es una hoja de metal delgada que rodea la apertura de la bolsa. La placa de celda separa la sección de gas limpio de la entrada de la casa de bolsas. Las partículas son filtradas por la bolsa y el aire limpio sale a través del exterior de la bolsa (Figura 6-7).

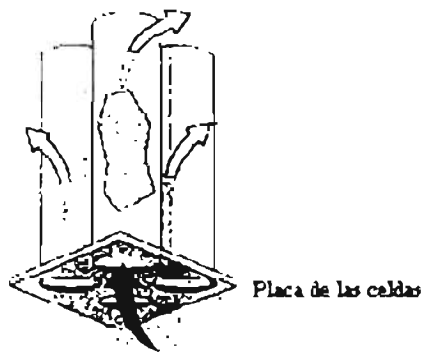


Figura 6-7. Filtración interior (las partículas se colectan adentro de la bolsa).

En sistemas de filtración interior, las bolsas se sostienen en la parte superior por diferentes tipos de accesorios. Para las casas de bolsas de flujo de aire invertido, este accesorio es un resorte y una tapa de metal (Figura 6-8).

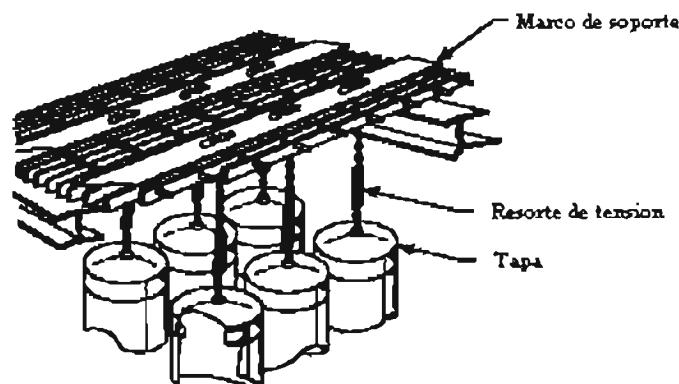


Figura 6-8. Bolsas para flujo invertido

Para las casas de bolsas por agitación, las bolsas se sujetan a la parte superior por un gancho (Figura 6-9).

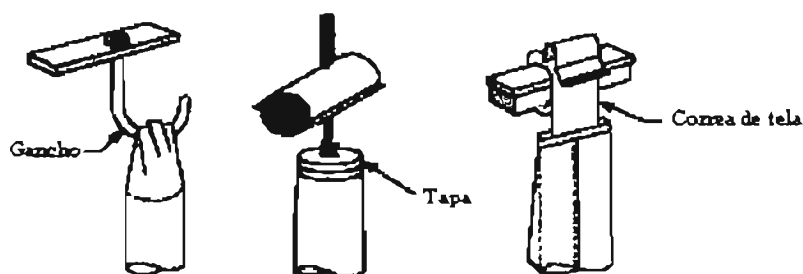


Figura 6-9. Bolsas para agitación

En sistemas exteriores, el polvo es colectado por fuera de las bolsas. El proceso de filtrado va del exterior de la bolsa al interior con la salida del gas limpio a través de la parte interna de la bolsa (Figura 6-10).

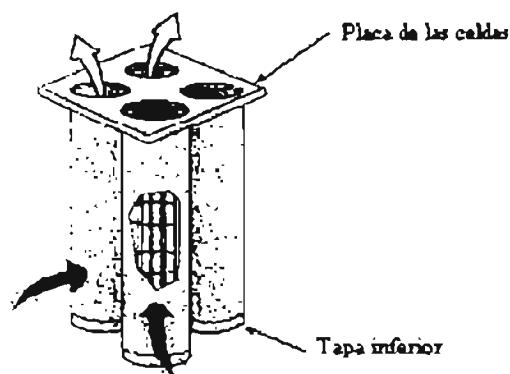


Figura 6-10. Filtración exterior (las partículas se colectan fuera de la bolsa)

Por consiguiente, algún tipo de soporte para la bolsa es necesario, normalmente una jaula interna en la bolsa o anillos cosidos en la tela de la bolsa. Las bolsas se sujetan en la parte superior a una hoja de metal con adaptaciones para alojar el tubo, y están cerradas por el fondo con una tapa de metal.

6.5 TIPOS DE LIMPIEZA DE LA BOLSA

Un gran número de mecanismos de limpieza se usan para remover partículas acumuladas en las bolsas. Los tres más comunes son agitación, flujo de aire invertido, y pulso de inyección de aire.

6.5.1 Agitación

La agitación pueden hacerse manualmente, pero usualmente se realiza mecánicamente en casas de bolsas a escala industrial. Las casas de bolsas pequeñas que manejan corrientes de descarga de menos de 500 cfm ($14.2 \text{ m}^3/\text{min}$) frecuentemente se limpian por palancas manuales. Sin embargo, la limpieza completa raramente se logra puesto que una gran cantidad de esfuerzo debe usarse durante varios minutos para remover el polvo acumulado en las bolsas. Además, estas pequeñas unidades normalmente no tienen un manómetro instalado en ellas para dar lectura de la caída de presión a través de la casa de bolsas. Estas lecturas se usan para determinar cuando es necesaria la limpieza de la bolsa. Por consiguiente, las casas de bolsas de agitación manuales son raramente usadas para controlar las emisiones de las partículas de fuentes industriales.

La agitación mecánica se lleva a cabo usando un motor que impulsa una flecha para que mueva una varilla conectada a las bolsas. Es un proceso de baja energía que suavemente agita las bolsas para remover las partículas depositadas. El movimiento de agitación y la velocidad depende del diseño del vendedor y la composición del polvo depositado en la bolsa (Figura 6-11). El movimiento de agitación generalmente es en dirección horizontal.



Figura 6-11. Agitación

La parte superior de las bolsas en una casa de bolsas por agitación se sellan o se cierran y se sostienen por un gancho o abrazadera (Figura 6-12). Las bolsas se agitan en la parte superior moviendo el marco donde las bolsas están sujetas. Esto causa que las bolsas se agiten y liberen el polvo (Figura 6-11).

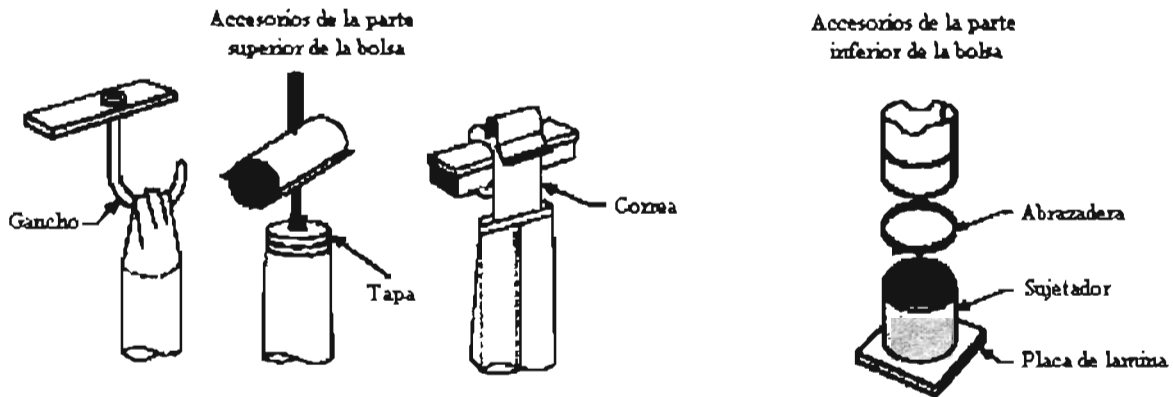


Figura 6-12. Accesorios de las bolsas para la limpieza por agitación en las casas de bolsa

El flujo de gas sucio se detiene durante el proceso de limpieza. Por lo tanto la casa de bolsas debe ser seccionada para ser utilizada en base continua. Las casas de bolsas por agitación normalmente usan filtración interna (el polvo se colecta dentro de las bolsas). Las bolsas para la agitación normalmente son de 15.2 a 45.7 cm (6 a 18 in.) de diámetro y más de 12.2 m (40 ft) de longitud.

En una casa de bolsas con agitación típica, las bolsas se sujetan a una flecha que se impulsa con un motor montado externamente (Figura 6-13). Las bolsas se agitan, y el polvo cae en una tolva localizada abajo de las bolsas. La duración del ciclo de limpieza puede durar de 30 segundos a pocos minutos.

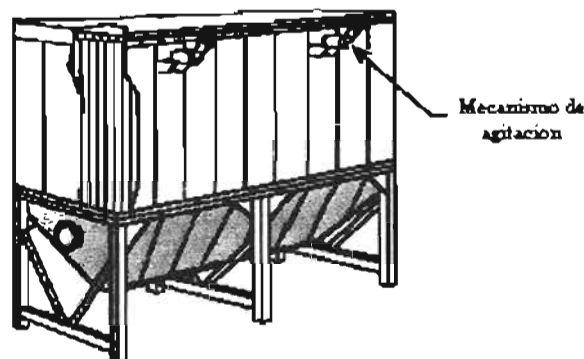


Figura 6-13. Agitador típico de una casa de bolsas

La frecuencia de la limpieza de la bolsa depende del tipo de polvo, la concentración del polvo, y la caída de presión a través de la casa de bolsas. La casa de bolsas normalmente tiene dos o más compartimientos para permitir que un compartimiento sea cerrado para limpieza.

La (Figura 6-14) muestran un mecanismo de agitación detallado típico de una casa de bolsas. Las bolsas se soportan en grupos de dos filas o montadas en marcos a través de lo ancho de la casa de bolsas. Un motor impulsa la palanca de agitación que a su vez causa que el marco se mueva y las bolsas se agiten.

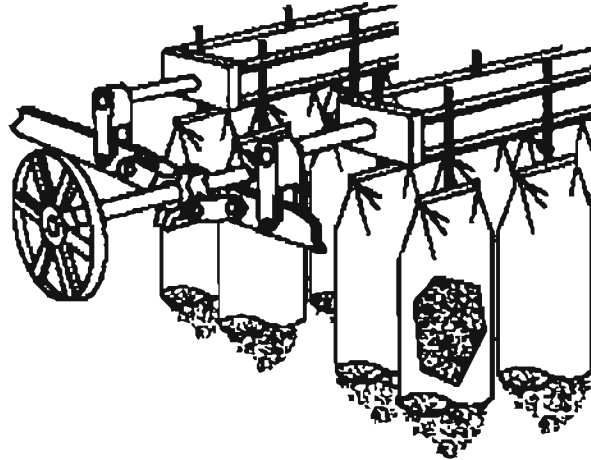


Figura 6-14. Detalle de un sistema de palanca para la agitación

La agitación no deben usarse cuando se coleccionan polvos pegajosos. La fuerza necesaria para remover el polvo pegajoso puede romper o rasgar la bolsa. El desgaste de la bolsa en conjunto, puede ser un problema en el fondo donde se sujeta la bolsa a la placa de la celda; pero el mayor desgaste es usualmente en la parte superior de la bolsa donde el soporte de apoyo se sujeta a la bolsa. La frecuencia apropiada de agitación es también importante para prevenir una falla temprana en la bolsa.

6.5.2 Flujo de aire invertido

El mecanismo de limpieza más simple de flujo de aire invertido, se lleva a cabo deteniendo el flujo de gas sucio en el compartimento y es relavado con un flujo de aire a baja presión. El polvo es removido meramente permitiendo que las bolsas colapsen, de este modo causa que el polvo acumulado se descomponga y caiga en la tolva (Figura 6-15).

La acción de limpieza es muy ligera y permite el uso de menos telas resistentes a la abrasión, tal como la fibra de vidrio. La limpieza por flujo de aire invertido generalmente se usa con telas entretejidas. La frecuencia de limpieza varía de 30 minutos a varias horas y depende de la concentración de polvo que entra y la caída de presión. La duración de la limpieza es aproximadamente de 10 a 30 segundos; el tiempo total es de 1 a 2 minutos incluyendo el tiempo para que la válvula abra y cierre, y para que el polvo sedimente.

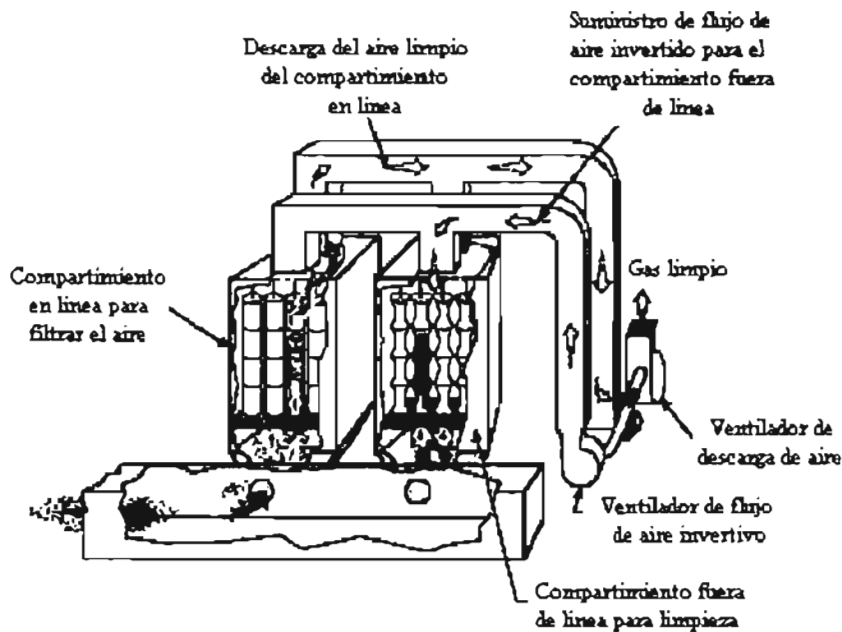


Figura 6-15. Casa de bolsas de flujo de aire invertido típica

Las casas de bolsas de limpieza por flujo de aire invertido son seccionadas para permitir que una sección fuera de la línea se pueda limpiar. Aunque el polvo puede ser colectado en el interior o el exterior de la bolsa, normalmente es reunido en el interior. La bolsa está abierta en el fondo y sellada por una tapa de metal en la parte superior (Figura 6-16). La bolsa contiene anillos para impedir que colapsen completamente durante el ciclo de limpieza.

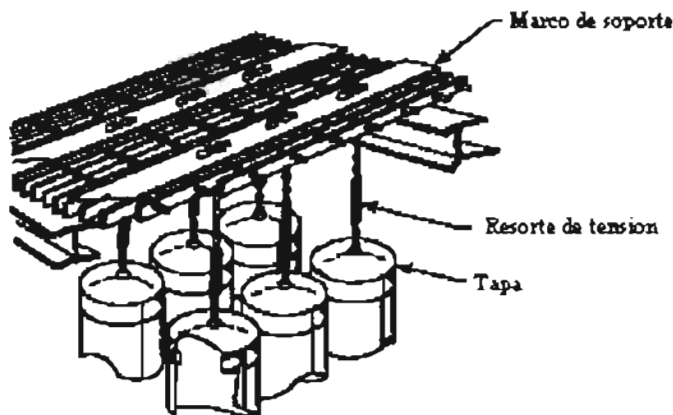


Figura 6-16. Accesorios de la bolsa, para las casas de bolsa de flujo de aire invertido

El colapso completo de la bolsa impide que el polvo entre en la tolva. Las bolsas son soportadas por anillos de acero pequeños cosidos al interior de la bolsa (Figura 6-17).

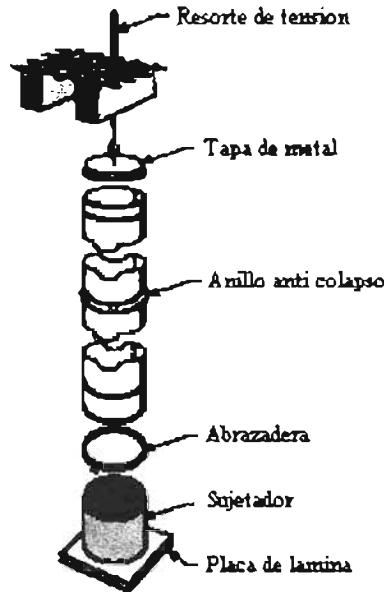


Figura 6-17. Construcción de una bolsa para casas de bolsa de flujo de aire invertido

Los anillos son colocados cada uno de 10 a 46 cm (4 a 18 in) a lo largo de la longitud de la bolsa, dependiendo de la longitud y el diámetro de la bolsa. Normalmente, el espacio entre los anillos de anti colapso es más grande en la parte superior de la bolsa y más pequeño cerca del fondo de la bolsa.

Las casas de bolsas de flujo de aire invertido usan bolsas muy grandes (cuando se comparan con las casas de bolsas por agitación o de pulso de inyección de aire) yendo de 20 a 46 cm (8 a 18 in.) de diámetro y de 6.1 a 12.2 m (20 a 40 ft) de longitud. Ocasionalmente las bolsa en las casas de bolsas por agitación son tan grandes como en las de flujo de aire invertido.

El aire de limpieza se suministra con un ventilador que normalmente es mucho más pequeño que el ventilador principal del sistema, puesto que sólo un compartimiento se limpia una vez.

6.5.3 Pulso de inyección de aire

Un tercer mecanismo comúnmente usado para la limpieza de la bolsa es el de pulso de inyección de aire o limpieza por inyección de aire a presión. El mecanismo de limpieza de pulso de inyección de aire usa aire inyectado a alta presión para remover el polvo de la bolsa. Las bolsas en el compartimiento de la casa de bolsas son soportadas internamente por anillos o jaulas de metal. Las bolsas se sostienen firmemente en su lugar en la parte superior por abrazaderas y normalmente tienen el fondo cerrado (con una tapa de metal).

El gas cargado de polvo se filtra a través de la bolsa, depositando el polvo por fuera de la superficie de la bolsa. Los pulsos de inyección de aire se usan para limpiar las bolsas en un sistema de filtración exterior.

El polvo acumulado es removido de la bolsa por un soplo de aire comprimido inyectado en la parte superior del tubo de la bolsa. El soplo de aire a alta presión detiene el flujo normal de aire a través del filtro de la bolsa. Sin embargo, durante la limpieza del pulso de inyección de aire, el flujo de aire sucio en el compartimiento de la casa de bolsas no se detiene. El soplo de aire se desarrolla en una onda vertical o de choque que causa que la bolsa se doble o extienda cuando la onda de choque viaja hacia abajo a través del tubo de la bolsa. Cuando la bolsa se dobla, fractura el polvo acumulado, y las partículas depositadas se descargan de la bolsa (Figura 6-18). La onda de choque viaja hacia abajo y hacia atrás al tubo en aproximadamente 0.5 segundos.

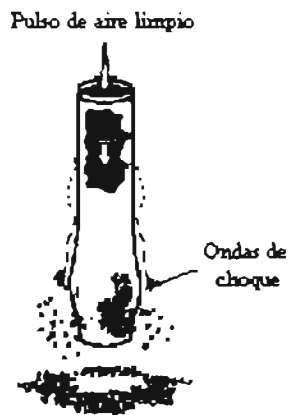


Figura 6-18. Limpieza por pulso de inyección de aire

En otro diseño, un anillo de cierre se cose en la parte superior de la bolsa el cual encaja en la apertura de la celda para el tubo. La jaula resbala dentro de la bolsa y la parte superior de la jaula se sienta en la placa del tubo (Figura 6-19).

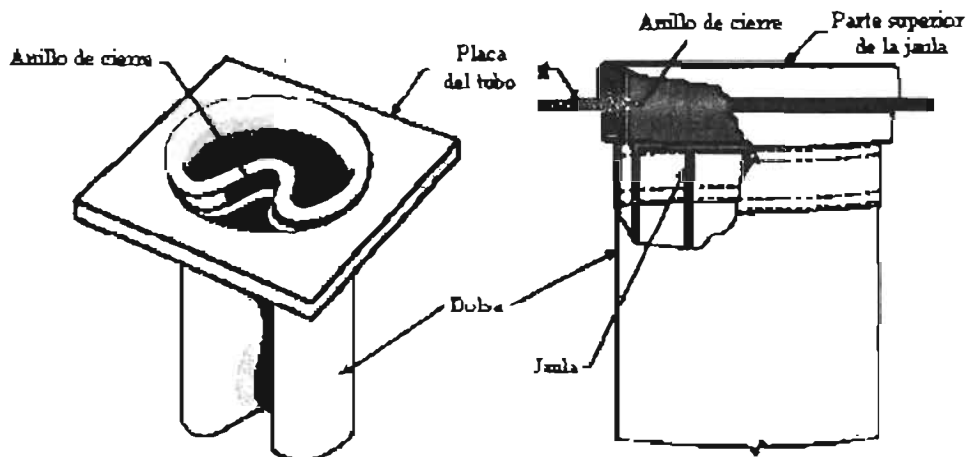


Figura 6-19. Bolsa con anillo de cierre para sistemas de pulso de inyección de aire

El soplo de aire comprimido debe ser bastante fuerte para que la onda de choque viaje la longitud de la bolsa y destruya o rompa el polvo acumulado. Las unidades de pulso de inyección de aire usan suministros de aire principal que alimenta el aire a través de una tubería de inyección separada, localizada sobre cada fila de bolsas en un compartimiento. El pulso de inyección de aire se dirige en las bolsas a través de boquillas u orificios localizados en la tubería de inyección (Figura 6-20). Una válvula de diafragma en cada tubería de soplado proporciona el mismo pulso uniforme de aire comprimido. La apertura y cerrado del diafragma es controlado por una válvula de solenoide operada eléctricamente.

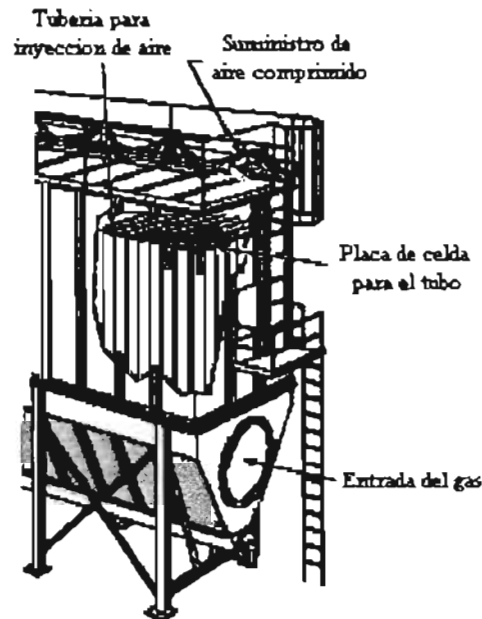


Figura 6-20. casa de bolsas de pulso de inyección de aire típica con suministro de aire

La mayoría las casas de bolsas de pulso de inyección de aire usan tubos de bolsa que son de 10.2 a 15.2 cm (4 a 6 in.) de diámetro. La longitud de la bolsa normalmente está alrededor de 2.4 a 3.7 m (8 a 12 ft), pero pueden ser más grandes como de 7.6 m (25 ft). Las casas de bolsas de pulso de inyección de aire usan bolsas mas pequeñas que las casas de bolsa por agitación y las de flujo de aire invertido.

6.6 COMPONENTES DE LA CASA DE BOLSAS

6.6.1 Bolsas

Las bolsas tubulares varían en longitud y diámetro que dependiendo en el diseño de la casa de bolsas y el fabricante. La longitud varía de 3 a 12 m (10 a 40 ft) y el diámetro normalmente está entre 10 y 46 cm (4 y 18 in.). Las bolsas se cuelgan verticalmente en la casa de bolsas (Figura 6-17). Las casas de bolsas de flujo invertido usan bolsas de 6 a 12 m (20 a 40 ft) de largo, con diámetros grandes de 30 a 46 cm (12 a 18 in). Las casas de bolsas de pulso de inyección de aire usan bolsas más pequeñas, de 2.4 a 3.7 m (8 a 12 ft) de largo, con diámetros de 10 a 16 cm (4 a 6 in.).



6.6.2 Coraza o Carcasa

Las casas de bolsas se construyen como una sola o como unidades con secciones. La de una unidad generalmente se usa en procesos pequeños que no están en funcionamiento continuo como en procesos de molienda y arenado.

Las unidades con secciones consisten de más de un compartimiento en la casa de bolsas y se usan en procesos de operación continuos con volúmenes de descarga grandes como hornos eléctricos para la fusión del acero y calderas industriales.

En ambos casos, las bolsas se alojan en una coraza hecha de un material de metal rígido.

De vez en cuando, es necesario incluir aislamiento con la coraza al tratar gas con alta temperatura. Esto se hace para prevenir que la humedad o la neblina del ácido se condensen en la unidad puesto que el ácido o agua pueden causar corrosión y deterioro rápido de la casa de bolsas.

6.6.3 Tolvas

Se usan tolvas para almacenar el polvo colectado temporalmente antes de que esté se deposite en un confinamiento o sea reutilizado en el proceso. El polvo debe ser removido para evitar que se acumule ya que esto puede hacer que la remoción se vuelva muy difícil.

Normalmente se diseñan las tolvas con una pendiente de 60° para permitir que el polvo fluya libremente de la parte superior de la tolva al fondo de la apertura de descarga.

Algunos fabricantes agregan dispositivos a la tolva para promover la descarga fácil y rápida. Estos dispositivos incluyen placas de impacto, agujeros de impacto, vibradores, e impactadores.

Las placas de impacto son simplemente pedazos de acero plano que se atornillan o se soldan al centro de la pared de la tolva. Si el polvo se comienza a pegar en la tolva, se golpea la placa de impacto varias veces con un mazo que liberara este material.

El diseño de la tolva también normalmente incluye puertas de acceso o puertos. Las puertas de acceso se proporcionan para la limpieza más fácil, inspección, y mantenimiento de la tolva(Figura 6-21).

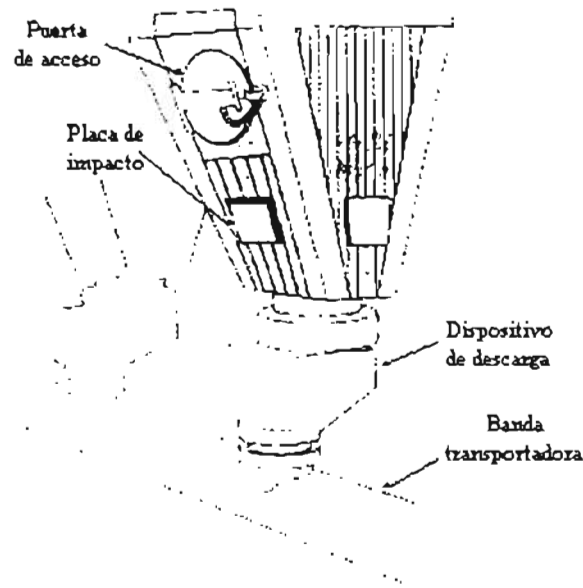


Figura 6-21. Tolva.

6.6.4 Dispositivos de descarga

Un dispositivo de descarga es necesario para vaciar la tolva y para cerrar la unidad a la atmósfera. Los dispositivos de descarga pueden ser manuales o automáticos. Algunos dispositivos de descarga que son usados en casas de bolsas incluyen compuertas corredizas, dispositivos de compartimiento rotatorio de bandas transportadoras, y transportadores neumáticos. Los transportadores neumáticos usan a aire comprimido o un soplador para transportar el polvo de la tolva.

6.7 CONSTRUCCIÓN DEL FILTRO

Los filtros de bolsa pueden hacerse de materiales tejidos o que no son tejidos. Los materiales que no son tejidos pueden ser más divididos como fieltro o membrana. La mayoría de las bolsas son completamente o parcialmente hechas por tejido, puesto que las telas no tejidas generalmente se sujetan a una base tejida llamada un bastidor.

Se hacen filtros tejidos de hilo con un patrón repetido definido. Los filtros de fieltro están compuestos de fibras comprimidas colocadas en forma aleatoria en una superficie y se sujetan ligeramente en el respaldo del material tejido. Una membrana es un filtro de un tratamiento especial donde una membrana porosa delgada, (de polifluorocarbono expandido) se une al bastidor, o tejido de soporte. Generalmente se usan filtros tejidos con métodos de limpieza de baja energía como agitación y aire invertido. Normalmente se usan tejidos de fieltro con sistemas de limpieza de alta energía tal como el de pulso de inyección de aire. Los filtros de membrana se desarrollaron en esfuerzos para lograr la captura de partícula de alta eficiencia y manejar condiciones del gas, donde la humedad alta y los problemas de caída de presión frecuentemente ocurren.



6.8 FIBRAS

Las fibras usadas para los filtros de tela varían y dependen de la aplicación industrial que va a ser controlada. Algunas fibras se hacen de fibras naturales como algodón o lana. Estas fibras son relativamente baratas pero tienen limitaciones de temperatura ($< 212^{\circ}\text{F}$ o 100°C) y sólo resistencia media a la abrasión. El algodón es fácilmente disponible, él es muy popular para aplicaciones simples a baja temperatura. La lana resiste muy bien la humedad y puede hacerse fácilmente un fieltro grueso.

Las fibras sintéticas como el nylon, Orlón, y poliéster tienen ligeramente limitaciones de temperatura más altas y resistencia a los químicos. Las fibras sintéticas son más caras que las fibras naturales. El Polipropileno es la fibra sintética más barata y se usa en muchas aplicaciones industriales, como fundiciones, trituradores de carbón, e industrias de alimentos. El nylon es la fibra sintética más resistente a la abrasión y la hace útil en aplicaciones donde se filtran polvos abrasivos. Las fibras de Poliéster o Dacrón tienen buenas cualidades globales para resistir ácidos, álcalis, y abrasión y son relativamente baratas y esto las hace útil para muchos procesos industriales como fundiciones de metal, y otras industrias metalúrgicas.

El Nomex (un tipo de poliamida aromática) es una marca registrada de fibras hechas por Du Pont. Du Pont hace las fibras, pero no las telas o bolsas. El Nomex es muy usado para las bolsas de filtros de tela debido a su resistencia a temperaturas relativamente altas y a la abrasión. El Nomex se usa para filtrar polvos de los enfriadores de cemento, dosificadoras de asfalto, hornos de ferroaleaciones, y secadores de carbón.

Otras fibras de marca registrada como Teflón (politetrafluoroetileno) y Fibra de vidrio (o vidrio) puede usarse en situaciones de temperaturas relativamente altas. El Teflón tiene una resistencia muy buena al ataque de los ácidos (excepto el flúor) y puede resistir temperaturas continuas por encima de 230°C (445°F).

Fibra de vidrio o vidrio se usa a menudo en casas de bolsas que manejan gas a temperaturas muy altas (por arriba de 260°C o 500°F) para funcionamiento continuo. Normalmente se lubrican las fibras de vidrio en alguna forma para que ellas resbalen entre sí encima sin romperse o cortarse durante el ciclo de limpieza. Normalmente se usa silicón grafito y Teflón como lubricante y puede ayudar a retener los límites superiores de temperatura de servicio. Las fibras de vidrio se pueden romper fácilmente y pueden requerir un ciclo de limpieza muy suave. Se ha usado Teflón y vidrio para remover las emisiones de partículas generadas de calderas industriales y calderas de carbón para los servicios auxiliares.

Otro material para hacer bolsas es la membrana Gore-tex. La membrana Gore-tex es un politetrafluoroetileno expandido (PTFE) que está laminada con una variedad de fibras como Fibra de vidrio, poliéster, y Nomex para producir fieltro y telas. Algunos informes han indicado la reducción de emisión muy buenas, caídas de presión bajas, incrementando la vida de la bolsa, y relaciones más altas de aire-tela, usando este material en industrias de metalúrgicas, industrias químicas, industrias alimenticias, y calderas de carbón.



La tabla 6-1 lista varias fibras típicas usadas para los filtros de tela. Las propiedades de las fibras listadas incluyen la temperatura límite, resistencia a los ácidos, álcalis y resistencia a la abrasión.

Tabla 6-1. Telas típicas usadas para las bolsas

Fibra	Temperatura máxima		Resistencia a los ácidos	Resistencia a los álcalis	Resistencia a la abrasión y tensión
	Continua	Transitoria			
	°C	°C			
Algodón	82	107	Pobre	Buena	Muy buena
Polipropileno	88	93	Excelente	Excelente	Muy buena
Lana	93	121	Muy Buena	Pobre	Regular a Buena
Nylon	93	121	Pobre a Regular	Excelente	Excelente
Orlon	116	127	Muy buena	Regular	Buena
Dacrón	135	163	Buena	Pobre	Muy buena
Nomex	204	218	Pobre a regular	Buena	Excelente
Teflón	232	260	Excelente (excepto fluoruros)	Excelente (excepto fluoruros, cloruros)	Regular
Fibra de vidrio	260	288	Regular a Buena	Regular a buena	Regular

6.9 MECANISMOS DE FALLA DE LA BOLSA

Tres mecanismos de falla pueden acortar la vida de operación de una bolsa. Ellos se relacionan a la durabilidad térmica, abrasión, y al ataque químico. La variable de diseño principal es la temperatura superior límite de la tela, o durabilidad térmica. La temperatura de descarga del proceso determinará qué material de tela debe usarse para la colección del polvo. El gas de descarga enfriado puede ser factible, pero el gas de descarga debe mantenerse bastante caliente para prevenir que la humedad o el ácido se condensen en las bolsas.

Otro problema frecuentemente encontrado en la operación de las casas de bolsa es la abrasión. La abrasión de la bolsa puede ser el resultado del rozamiento de las bolsas unas con otras, del tipo de limpieza usado para la bolsa, o donde el polvo entra en la bolsa y tiene contacto el material de la tela. Por ejemplo, en una casa de bolsa por agitación, la agitación vigorosa puede causar deterioro de la bolsa prematuro, particularmente en los puntos donde las bolsas son sujetadas.

En unidades de pulso de inyección de aire continuo, el movimiento ligero de las bolsas contra las jaulas de apoyo puede afectar también en serio la vida de la bolsa. Éste puede ser solo el problema de mantenimiento más grande asociado con las casas de bolsas.

La falla de la bolsa también puede ocurrir del ataque químico a la tela. Cambios en composición del polvo y las temperaturas del gas de descarga de los procesos industriales pueden afectar ampliamente el material de la bolsa. Si la corriente del gas de descarga se baja a su punto del rocío o si una nueva especie química se crea, el diseño de la casa de bolsas (elección de la tela) puede ser completamente inadecuado.



La selección de la tela apropiada y las buenas prácticas de operación del proceso pueden ayudar a eliminar la deterioración de la bolsa causado por el ataque químico.

6.10 VELOCIDAD DE FILTRACIÓN: RELACIÓN DE AIRE-TELA

Una variable de diseño en una casa de bolsas es la relación de aire-tela (relación de filtración). Las relaciones Aire-tela (A/T) describen cuánto gas sucio pasa a través de un área de superficie dada del filtro en un tiempo dado. Una relación de aire-tela alta significa que un volumen grande de aire pasa a través del área de la tela. Una relación de aire-tela baja significa que un volumen pequeño de aire pasa a través de la tela. Normalmente se expresan las relaciones de aire-tela en unidades de $(\text{cm}^3/\text{sec})/\text{cm}^2$ de tela $(\text{ft}^3/\text{min})/\text{ft}^2$. Los términos de velocidad de filtración y relación de aire-tela (A/T) pueden usarse intercambiamente.

6.11 COMPARACIONES DE LA LIMPIEZA DE LA BOLSA

La limpieza de las casas de bolsas de flujo invertido generalmente tienen relaciones de aire-tela muy bajas. Para las casas de bolsas de flujo invertido, la velocidad de filtrado (velocidad de filtración) el rango usualmente está entre 1 y 4 ft/min (0.51 y 2.04 cm/seg).

Para casas de bolsas por agitación, los rangos de velocidad de filtrado están entre 2 y 6 ft/min (1.02 y 3.05 cm/seg). Más tela generalmente se necesita para una relación de flujo dada en una casa de bolsas de flujo invertido que en una casa de bolsas por agitación. Puesto que, las casas de bolsas de flujo invertido tienden a ser más grande en tamaño.

Las casas de bolsas por pulso de inyección de aire se diseñan con velocidades de filtrado entre 2 y 15 ft/min (1 a 7.5 cm/seg), con muchas velocidades que caen el rango de 2.0 a 2.5 ft/min. Por consiguiente, estas unidades típicamente usan telas de fieltro como material para la bolsa. Los materiales de fieltro se mantienen muy bien bajo la velocidad de filtración alta y la limpieza vigorosa de pulso de inyección de aire.

Debido a sus relaciones de A/T típicamente más altas, las casas de bolsas de pulso de inyección de aire son generalmente más pequeños en tamaño que las casas de bolsas de flujo invertido y las casas de bolsas por agitación.

Las telas con estabilidad dimensional más alta y alta resistencia a la tensión se requieren para estas unidades. Se dan relaciones de aire-tela para los varios métodos de limpieza en la tabla 6-2.

La relación de A/T (velocidad de filtración) es un factor muy importante usado en el diseño y funcionamiento de una casa de bolsas. Las relaciones impropias pueden contribuir al funcionamiento ineficiente de la casa de bolsas. Una relación de operación de A/T que es demasiado alta puede llevar a varios problemas.



Tabla 6-2. Comparación de relación típica de Aire-Tela (Velocidad de filtración) para tres mecanismos de limpieza.

Mecanismos de limpieza	Relación aire-tela		Velocidad de filtración	
	(cm ³ /seg)/cm ²	(ft ³ /min)/ft ²	cm/seg	ft/min
Agitación	1 a 3:1	2 a 6:1	1 a 3:1	2 a 6:1
Aire invertido	0.5 a 2:1	1 a 4:1	0.5 a 2:1	1 a 4:1
Pulso de Inyección	1 a 7.5:1	2 a 15:1	1 a 7.5:1	2 a 15:1

Las relaciones muy altas pueden causar compactación del polvo en la bolsa que produce caídas de presión excesivas. Además, el colapso del polvo acumulado también podría ocurrir, el cual a su vez resultaría en reducir la eficiencia de colección.

El problema mayor de una casa de bolsa que usa una relación de A/T muy baja es que las casas de bolsas serán más grandes en tamaño, y por consiguiente tiene un alto costo de capital.

6.12 CAÍDA DE PRESIÓN EN LOS FILTROS

Otra consideración importante es la caída de presión a través de los filtros de tela. Para una tela de filtro relativamente limpia, la caída de presión es alrededor de ½ in de H₂O y la eficiencia de remoción es baja.

La caída total de presión es la suma de la caída debida a la tela más la contribución de la capa de polvo. Por lo tanto, la caída de presión tanto para la capa de polvo como para el filtro limpio se puede representar por la ecuación de Darcy.

$$\frac{\Delta P}{x} = \frac{V\mu_R}{K} \quad (6-1)$$

La ecuación de Darcy se puede reorganizar y combinar para calcular la caída de presión total ΔP_T , tomando en cuenta la caída de presión a través de la tela del filtro y la caída de presión del polvo acumulado (torta), la cual produce la (Ecuación 6-2) que es de tipo iterativa.

$$\Delta P_T = K_f V_f + K_2 C_i V_f^2 t \quad (6-2)$$

Donde

ΔP_T = Caída de presión total, in H₂O

K_f = Resistencia de la tela, in H₂O/ft-min o cm H₂O/cm-seg

V_f = Velocidad de filtración. ft/ min o cm/seg

K_2 = Resistencia de la capa de polvo, in H₂O/(lb/ft²*ft/min)

C_i = Concentración del material lb/ft³

t = Tiempo de filtración entre agitaciones, min o seg



CAPÍTULO VII

PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS



CAPÍTULO VII. PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS

7.1 PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS

Los Precipitadores Electrostáticos (PES) se usan para reducir las emisiones de partículas en muchas aplicaciones industriales. Los PES han sido diseñados para coleccionar partículas con diámetros de 0.1 μm a 10.0 μm , la eficiencia de colección se considera alta, algunas veces excede el 99%. La habilidad de los PES para manejar grandes volúmenes de gases de descarga a temperaturas entre 175 y 700° C (350 a 1300° F) los hace muy atractivos para muchas industrias.

7.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS

Todos los precipitadores electrostáticos, sin tener en cuenta sus diseños particulares, contienen los siguientes componentes esenciales:

- Electrodo de descarga
- Electrodo de colección
- Sistema eléctrico
- Vibrador
- Tolva
- Coraza o Carcasa

El electrodo de descarga es usualmente un alambre de metal de diámetro pequeño que cuelgan verticalmente en el (precipitador electrostático). Este electrodo se usa para ionizar el gas (que carga las partículas) y para crear un fuerte campo eléctrico.

El electrodo de colección es una placa plana o tubo con una carga opuesta a el electrodo de descarga. El electrodo de colección colecciona las partículas cargadas.

El sistema eléctrico consiste de componentes de alto voltaje usados para controlar la fuerza del campo eléctrico entre los electrodos de descarga y de colección.

El vibrador imparte una vibración, o golpe, a los electrodos, removiendo el polvo coleccionado. Los vibradores remueven el polvo que a sido acumulado en los electrodos de colección y de descarga. De vez en cuando, se usan rocíos de agua para remover el polvo de los electrodos de colección. Estos precipitadores son llamados PES de pared mojada.

Las tolvas se localizan en el fondo del precipitador. Las tolvas se usan para coleccionar y temporalmente guardar el polvo removido durante el proceso de golpeado.

La coraza encierra la estructura, los electrodos y soporta el PES completo.

Los PES que usan placas como electrodos de coleccion son llamados precipitadores de placa. Los PES que usan tubos como electrodos de coleccion son llamados precipitadores tubulares. La (Figura 7-1) muestra un PES típico con sus componentes esenciales.

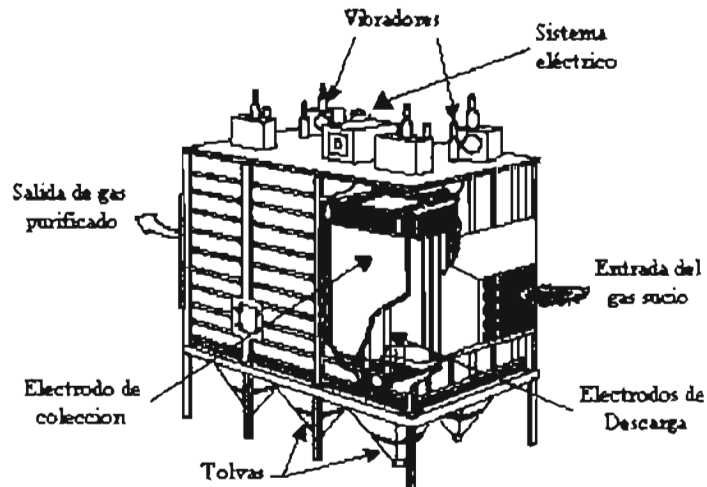


Figura 7-1. Precipitador electrostático típico

7.3 PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS DE PLACA

Los PES de placa son usados más frecuente que los precipitadores tubulares. Un alto voltaje crea un campo eléctrico intenso, el cual carga las partículas cuando el gas pasa a través del precipitador.

Los flujos de gas sucios en una cámara consisten de una serie de electrodos de descarga que son espaciados igualmente a lo largo de la línea central entre las placas de colección adyacentes (Figura 7-2).

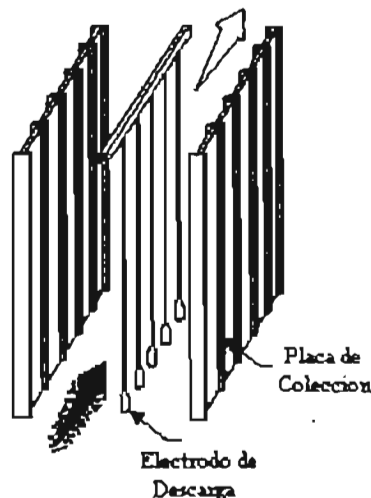


Figura 7-2. Flujo de gas a través de un precipitador de placa

Los electrodos de descarga son aproximadamente de 0.13 a 0.38 cm (0.05 a 0.15 in.) de diámetro. Las placas de colección están normalmente entre 6 y 12 m (20 y 40 ft) de alto. Las placas están usualmente espaciadas de 20 a 30 cm (8 a 12 in.) de separación.

7.4 PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS TUBULARES

Los precipitadores tubulares consisten de electrodos de colección cilíndricos (tubos) con electrodos de descarga (alambres) localizados en el centro del cilindro (Figura 7-3). Los flujos de gas sucio en los tubos, donde las partículas se cargan. Las partículas cargadas son después colectadas en las paredes interiores de los tubos. El polvo o líquido colectado es removido lavando los tubos con rocíos de agua localizados directamente sobre los tubos.

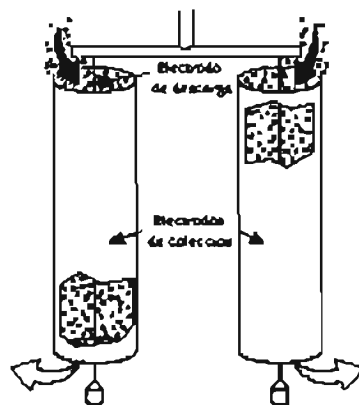


Figura 7-3. Flujo de gas a través de un precipitador tubular

Los PES tubulares son generalmente usados para coleccionar espumas o nieblas. Los diámetros de los tubos típicamente varían de 0.15 a 0.31 m (0.5 a 1 ft), con longitudes que usualmente varían de 1.85 a 4.0m (6 a 15 ft).

7.5 CARGA DE LAS PARTÍCULAS EN EL PRECIPITADOR

Puesto que la mayoría de los precipitadores tienen placas como electrodos de colección, los PES de placas pueden usarse para entender esto. Las partículas suspendidas en el gas son cargadas cuando ellas pasan a través del precipitador electrostático. Se suministra un alto voltaje de corriente directa por medio de pulsaciones a un sistema que consiste de un electrodo de descarga de diámetro pequeño y un electrodo de colección. El electrodo de descarga es usualmente cargado negativamente. La placa de colección es regularmente conectada a tierra.

El voltaje aplicado se incrementa hasta que se produzca una *descarga corona*, que puede verse como una luz azul brillante alrededor del electrodo de descarga (Figura 7-4).

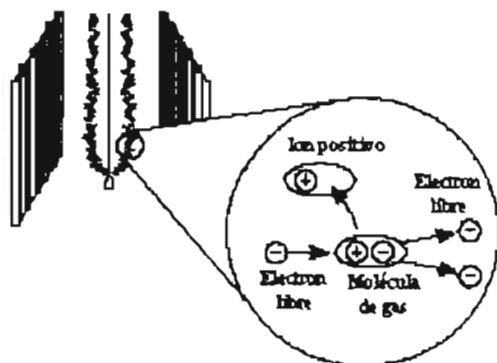


Figura 7-4. Generación de la corona

La corona causa que las moléculas del gas se ionicen. Los iones de gas negativos que son producidos emigran hacia el electrodo de colección conectado a tierra. Los iones de gas negativos bombardean las partículas suspendidas en la corriente de gas, impartiendoles una carga negativa a ellas. Las partículas negativamente cargadas después emigran a el electrodo de colección y son colectadas (Figura 7-5).

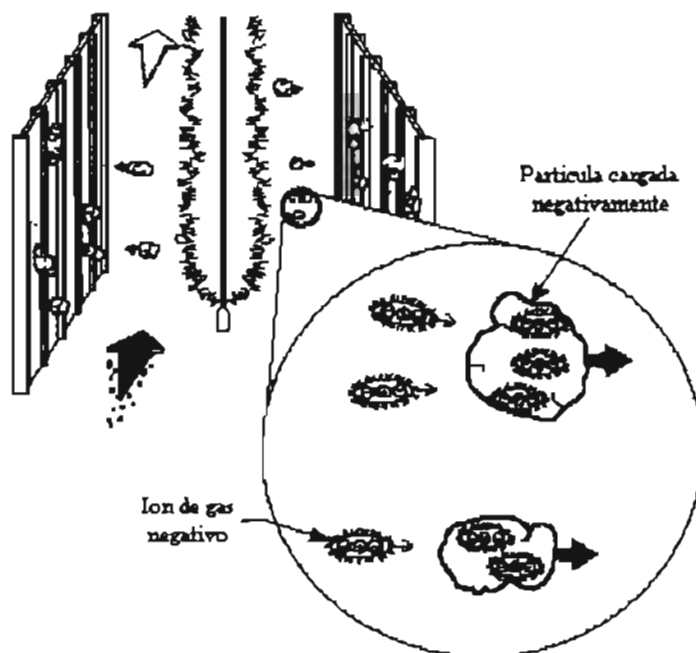


Figura 7-5. Partícula cargada

7.6 DESCARGA DE LAS PARTÍCULAS EN EL ELECTRODO DE COLECCIÓN

Cuando una partícula cargada alcanza el electrodo de colección conectado a tierra, la carga en la partícula es sólo descargada parcialmente. La carga se escapa lentamente a la placa de colección conectada a tierra. Una porción de la carga se retiene y contribuye a las fuerzas de adhesión intermolecular y cohesivas que sostienen las partículas en las placas (Figura 7-6).

Las partículas se sostienen a las placas a través de fuerzas de adhesión. Las partículas recientes que arriban se sostienen a las partículas colectadas a través de fuerzas de cohesión. Se permite que la capa de polvo se construya en la placa a un espesor deseado de 0.08 a 1.27 cm (0.03 a 0.5 in.), y entonces el ciclo de golpeteo se inicia. Los ciclos de golpeteo se inician en un ciclo de tiempo establecido.

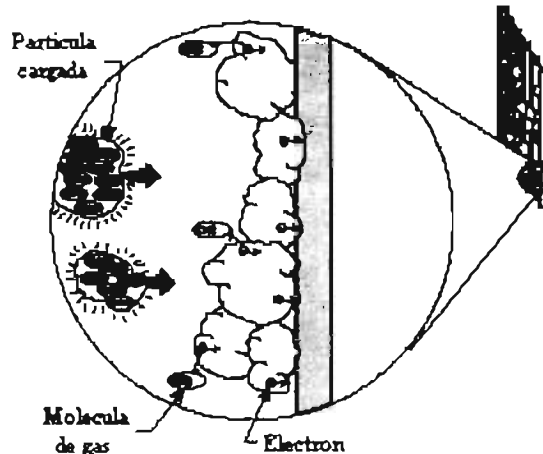


Figura 7-6. Colección de partículas en el electrodo de colección

7.7 SEPARACIÓN DE LAS PARTÍCULAS EN LA TOLVA

Las placas del precipitador se hacen vibrar periódicamente mientras se mantiene el proceso continuo de limpieza del gas. En otras palabras, las placas se golpean mientras el PES está en línea; el flujo de gas continúa a través del precipitador y el voltaje aplicado permanece constante. En los precipitadores de pared húmeda, los tubos se limpian por rocíos de agua. En la mayoría de los otros precipitadores, las partículas secas depositadas, son desalojadas enviando impulsos mecánicos, o vibraciones, a las placas de colección.

Las placas se golpean cuando la capa del polvo acumulado es relativamente gruesa 0.08 a 1.27 cm o (0.03 a 0.5 in.). Esto permite que la capa de polvo se caiga de las placas como hojas de agregados grandes y con esto ayudan a eliminar el rearrastre del polvo. La mayoría de los precipitadores tienen vibradores ajustables para que puedan cambiar la intensidad del golpeteo de acuerdo a la concentración del polvo en el gas.

El polvo desalojado cae de las placas en la tolva. La tolva es un solo cubo de colección con una pendiente de 50 a 70° para permitir que el polvo fluya libremente de la parte superior de la tolva a la apertura de la descarga. El polvo debe ser removido tan pronto como sea posible para evitar que el (polvo) se acumule. El polvo acumulado es muy difícil de quitar.

La mayoría de las tolvas son vaciadas por algún tipo de dispositivo de descarga rotatorio, transportador sin fin o transportador neumático. Una tolva típica con un tornillo sin fin se muestra en la (Figura 7-7).

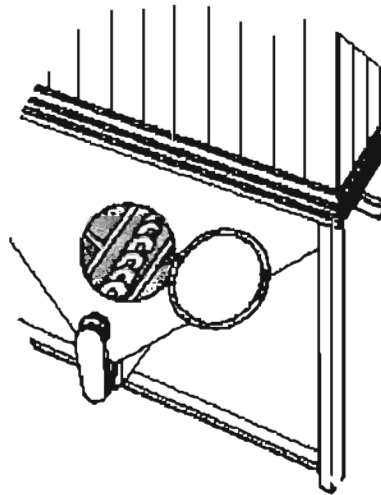


Figura 7-7. Tolva y tornillo sin fin.

7.8 COMPONENTES DE LOS PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS

7.8.1 Electrodo de Descarga

Los electrodos de descarga en la mayoría del diseño del precipitador son alambres delgados, redondos que varían de 0.13 a 0.38 cm (0.05 a 0.15 in.) de diámetro. El diámetro del tamaño más común para los alambres es aproximadamente 0.25 cm (0.1 in.).

Los electrodos de descarga se cuelgan verticalmente, soportados en la parte superior por un marco, y se sostienen tensos y a plomo por un peso en el fondo.

Los alambres normalmente se hacen de acero al alto carbón, pero también se construyen de acero inoxidable, cobre, aleaciones de titanio, y aluminio. Los pesos se hacen de hierro fundido y generalmente son de 11.4 kg (25 lb) o más.

Los alambres de descarga son soportados para ayudar a eliminar fisuras de una fatiga mecánica. Los alambres se mueven bajo la influencia de fuerzas aerodinámicas y eléctricas y están sujetos a esfuerzos mecánicos.

Los pesos en el fondo del alambre se atan a marcos guiados para ayudar a mantener alineado el alambre. Sujutando los pesos puede prevenir que estos caigan en la tolva en el evento que el alambre se rompa (Figura 7-8).

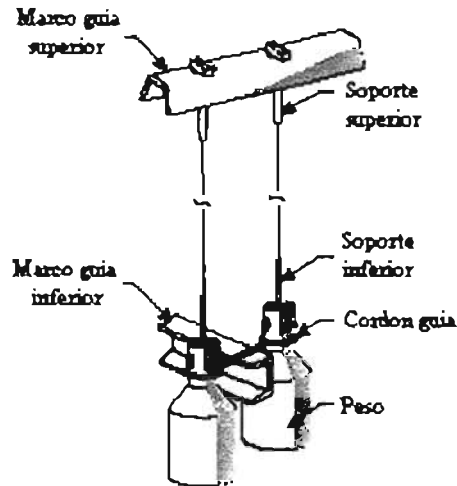


Figura 7-8. Marcos de guía y soportes para los alambres de descarga

Los pesos que son 11.4 kg (25 lb) se usan con alambres de 9.1 m (30 ft) de largo, y los pesos de 13.6 kg (30 lb) se usan con alambres de 10.7 a 12.2 m (35 a 40 ft) de largo. Normalmente se cubre el fondo y la parte superior de cada alambre con un soporte de tubería de acero. Los soportes ayudan a minimizar el chispeo y desgaste del metal por consecuencia de chispas en estos puntos del alambre.

El tamaño y forma de los electrodos son gobernados por los requerimientos mecánicos para el sistema, tal como el proceso industrial en el que el PES se instala y la cantidad y propiedades del gas que es tratado. La mayoría de los diseñadores han usado tradicionalmente alambres delgados, alambres redondos para la generación de la corona. Algunos diseñadores han usado también alambre en espiral, alambre en rectángulo, alambre armado con púas, o otras configuraciones, algunos de estos se ilustran en la (Figura 7-9).

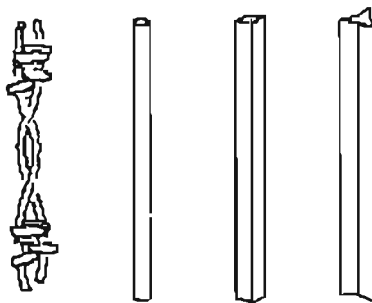


Figura 7-9. Electrodo de alambre de descarga típicos

Los fabricantes de los más nuevos sistemas usan marcos de soporte rígidos para los electrodos de descarga. Los marcos pueden consistir en resortes de alambres, láminas dentadas, o puntas de aguja montados en unas láminas de soporte. Un electrodo de descarga de marco rígido típico se muestra en la (Figura 7-10). El propósito del marco rígido es eliminar el posible balanceo de los alambres de descarga.

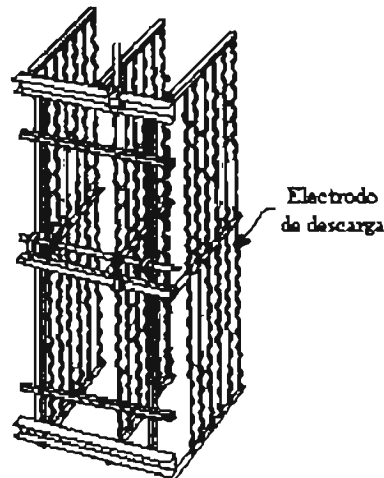


Figura 7-10. Diseño de un electrodo de descarga de marco rígido.

Otro tipo de electrodo de descarga es un electrodo rígido que se construye de una sola pieza fabricado de metal y se muestra en la (Figura 7-11). Ambos diseños son ocasionalmente llamados electrodos de marco rígido. Ellos se han usado con éxito como los viejos diseños de alambre. Una desventaja mayor del diseño de marco rígido es que un alambre roto no puede reemplazarse sin remover el marco entero.

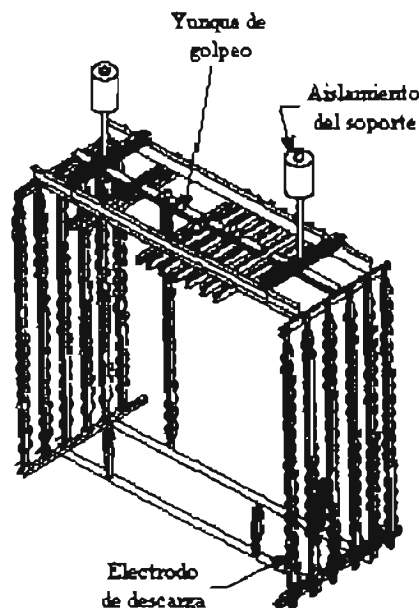


Figura 7-11. Electrodo típico de descarga rígido

Unos fabricantes usan placas planas en lugar de los alambres para los electrodos de descarga. Las placas, se muestran en la (Figura 7-12), incrementando el campo eléctrico promedio que puede usarse para coleccionar las partículas y proporciona un incremento en el área de la superficie para coleccionar partículas, en la descarga y las placas de colección. La corona es generada por las agujas afiladas sujetas en las placas.

Estas unidades generalmente usan polaridad positiva para cargar las partículas. Las unidades se operan típicamente con baja velocidad de gas para prevenir el rearrastre de las partículas durante el ciclo de golpeo.

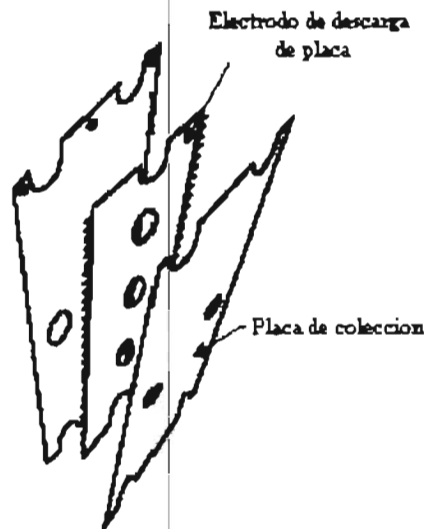


Figura 7-12. Electrodo de descarga de placa plana

7.8.2 Electrodo de colección

La mayoría de los precipitadores usan electrodos de colección de placa porque estos tratan grandes volúmenes de gas y usualmente tienen una eficiencia de colección alta. Las placas generalmente se hacen de acero al carbón.

Sin embargo, se hacen placas ocasionalmente de acero inoxidable o una aleación de acero para condiciones especiales de la corriente de gas donde la corrosión en las placas de acero al carbón puede ocurrir.

El espesor de las placas va de 0.05 a 0.2 cm (0.02 a 0.08 in.). Para los PES con electrodos de descarga de alambre, las placas tienen de 15 a 30 cm de separación (6 a 12 in.). El espacio normal para el PES de alta eficiencia (que usa alambres) es 20 a 23 cm (8 a 9 in.).

Para los PES que usan marco rígido o electrodos de descarga de placa, las placas de colección típicamente tienen de 30 a 38 cm (12 a 15 pulgadas) de separación. Las placas normalmente están entre 6 y 12 m (20 a 40 ft) de alto.

Las placas de colección se construyen en varias formas, como se muestra en la (Figura 7-13). Estas placas son hojas sólidas que a veces se refuerzan con refuerzos estructurales para incrementar la resistencia de la placa. En algunos casos, los refuerzos actúan como deflectores para ayudar a reducir pérdidas por la reintroducción de partículas.

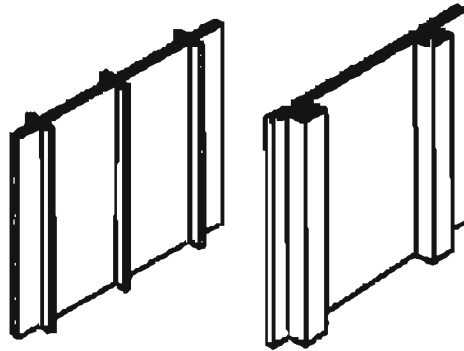


Figura 7-13. Placas de colección típicas

7.8.3 Coraza

La coraza envuelve la estructura, los electrodos y los soportes de los componentes del precipitador en un marco rígido para mantener una alineación apropiada del electrodo y configuración (Figura 7-14). La estructura de soporte es especialmente crítica para los precipitadores, porque los componentes del precipitador pueden expandirse y contraerse a causa de la temperatura de operación. Las temperaturas excesivas pueden tensar literalmente, rompiendo la coraza y las juntas de la tolva y separar las soldaduras.

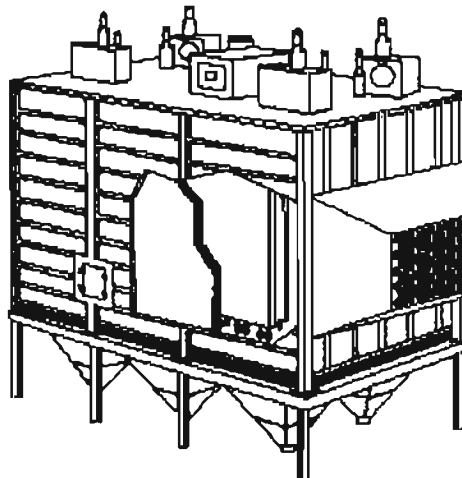


Figura 7-14. Coraza de un PES

Las placas de colección y los electrodos de descarga normalmente se soportan al marco de la parte superior para que los elementos cuelguen verticalmente debido a la gravedad. Esto permite que los elementos se expandan o se contraigan con los cambios de temperatura sin que se atoren o deformen.

Las corazas, tolvas y uniones deben cubrirse con un aislamiento para conservar el calor, y para prevenir corrosión que es el resultado de la condensación del vapor de agua y ácido en los componentes internos del precipitador.



Si el PES se instala en una caldera de carbón, la temperatura del gas debe mantenerse por arriba de 120°C (250°F) en todo momento para prevenir que cualquier neblina ácida en el gas se condense en los componentes internos del PES. El aislamiento también ayudará a minimizar el esfuerzo diferencial por temperatura.

Las tolvas para las cenizas deben aislarse y mantenerse calientes porque las cenizas volantes frías tienen una tendencia a endurecerse y esto las hace sumamente difícil de quitar.

El precipitador debe diseñarse para proporcionar fácil acceso a los puntos estratégicos del colector para una inspección interna de la alineación del electrodo, para el mantenimiento, y para limpieza de electrodos, tolvas, y uniones de conductos durante interrupciones.

7.8.4 Vibradores

El polvo que se ha acumulado en los electrodos de colección y descarga son removidos por impactos. El polvo depositado generalmente es desalojado a través de impulsos mecánicos, o vibraciones impartidas a los electrodos.

Un sistema de vibración se diseña para que la intensidad y frecuencia del golpeo puedan ser ajustados para las condiciones variables de operación.

Una vez que las condiciones de operación se fijan, el sistema debe ser capaz de mantener un golpeo uniforme durante mucho tiempo.

7.8.5 Martillo

Las placas de colección son golpeadas a través de varios métodos. Un sistema de golpeo usa martillos montados en un eje rotatorio, como se muestra en la (Figura 7-15).

Cuando el eje rota, los martillos caen (por gravedad) y golpean los yunques que se sujetan a las placas de colección. Pueden montarse impactadores en la parte superior o al lado de las placas de colección.

La intensidad del golpeo es controlada por el peso de los martillos y la longitud del martillo montado en el brazo. La frecuencia de golpeo puede ser cambiada ajustando la velocidad de rotación de los ejes.

De este modo, la intensidad y frecuencia de golpeo pueden ajustarse para la variación de la concentración del polvo en el gas.

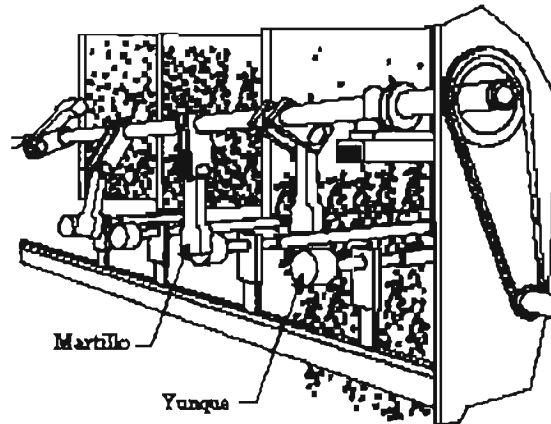


Figura 7-15. Impactadores de Martillo/yunque típico para las placas de colección

7.8.6 Impulso magnético

Otro sistema de golpeteo usado para muchos diseños consisten en impactadores de pulso magnético para remover las capas de polvo acumulado en las placas de colección. Un impactador de pulso magnético tiene un pistón de acero que se levanta por un pulso de corriente en una bobina.

El pistón levantado cae entonces hacia atrás, debido a gravedad, golpeando una varilla conectada a varias placas dentro del precipitador como se muestra en la (Figura 7-16).

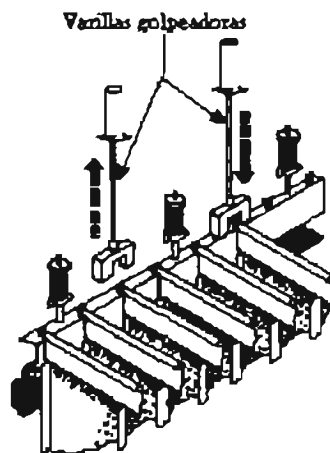


Figura 7-16. Impactadores de pulso magnético típicos para las placas de colección

La frecuencia del golpeteo y intensidad son reguladas fácilmente por un sistema de control eléctrico. La frecuencia podría ser un golpe cada cinco minutos o un golpe en una hora. Los impactadores de impulsos magnéticos normalmente operan más frecuentemente, pero con menos intensidad, que los impactadores de martillo y yunque.

7.8.7 Vibrador eléctrico

Los electrodos de descarga o corona también deben ser golpeados para prevenir depósito de polvo excesivo que interfiera con la generación de la corona. Esto es normalmente se lleva a cabo por el uso de aire o vibradores eléctricos que suavemente hacen vibrar los alambres de descarga.

Los vibradores normalmente se montan externamente en el techo del precipitador y son conectados por varillas a los marcos de alta tensión que soportan los electrodos de la corona (Figura 7-17). Un aislador, localizado sobre la varilla, aísla eléctricamente al impactador mientras mecánicamente transmite la fuerza de vibración.

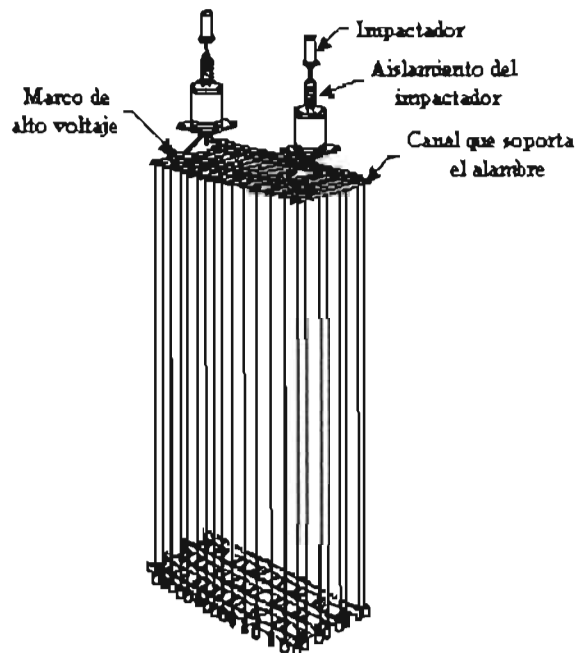


Figura 7-17. Impactadores de vibrador eléctrico típicos usados para los electrodos de descarga de alambre

7.8.8 Martillos giratorios para Electroodos de Descarga de Marco Rígido

Los electrodos de descarga de marco rígido son golpeados por martillos giratorios. Los martillos giratorios operan similarmente como los martillos usados para remover el polvo de los electrodos de colección. Los martillos se colocan en un eje horizontal.

Cuando el eje rota, los martillos golpean una viga de impacto la cual que transfiere el golpe, o la vibración, a el centro del tubo en el sistema de descarga, que causa que el polvo se caiga (Figura 7-18).

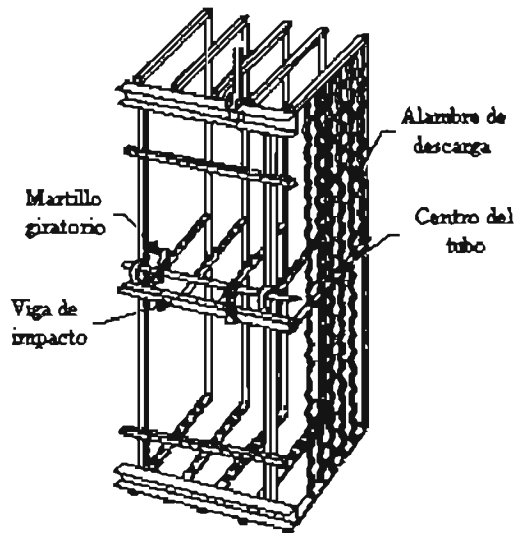


Figura 7-18. Martillos giratorios para electrodo de descarga de marco rígido

7.8.9 Equipo de transformador y rectificador (T-R).

El equipo de alto voltaje determina y controla la fuerza del campo eléctrico generado entre los electrodos de descarga y de colección.

Esto se realiza por medio del uso de un equipo de suministro de energía que consiste en tres componentes: un transformador elevador, un rectificador de alto voltaje, y un control para medición y protección automático contra corto circuito.

El sistema de energía mantiene el voltaje al nivel más alto sin causar exceso de chispa entre el electrodo de descarga y la placa de colección.

En un equipo de T-R, el transformador aumenta el voltaje de 400 voltios a aproximadamente 20,000 hasta 70,000 voltios. Este alto voltaje ioniza las moléculas del gas que carga las partículas en el gas.

El rectificador convierte corriente alterna a corriente directa. La corriente directa (o corriente unidireccional) se requiere para la precipitación eléctrica. La mayoría del precipitadores modernos usan rectificadores de silicio en estado sólido y los transformadores de alto voltaje están llenos de aceite, el cual sirve como aislante.



CAPÍTULO VIII

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS EQUIPOS



CAPÍTULO VIII. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS EQUIPOS

8.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CÁMARAS DE SEDIMENTACIÓN

Ventajas

1. Bajos costos de construcción.
2. Equipo relativamente sencillo con pocos problemas de mantenimiento (sin placas deflectoras).
3. Bajo consumo de energía.

Desventajas

1. Baja eficiencia en la recolección de partículas finas.
2. Requiere mucho espacio.

8.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE COLECTORES MECÁNICOS

Ventajas

1. Bajo costo de construcción.
2. Equipo relativamente sencillo con pocos problemas de mantenimiento.
3. Caídas de presión de operación relativamente baja (para el nivel de eliminación de partículas obtenido) en el rango de aproximadamente de 2 a 6 pulgadas de columna de agua (in H₂O).
4. Limitaciones de temperatura y presión impuestas solamente por los materiales de construcción utilizados.
5. Recolección y colocación final en seco.
6. Requerimientos de espacio relativamente pequeños.

Desventajas

1. Eficiencias de recolección de partículas relativamente baja, especialmente de aquellas cuyo diámetro es menor a 10 μm .
2. Incapacidad para manejar materiales pegajosos.

8.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE COLECTORES HÚMEDOS

Ventajas

1. No son fuentes secundarias de polvo.
2. Requerimientos de espacio relativamente pequeños.
3. Capacidad para coleccionar gases y partículas (especialmente las pegajosas).



4. Capacidad para manejar corrientes de gas a altas temperaturas y con alto contenido de humedad.
5. Bajo costo de capital (si no se requiere sistema de tratamiento de desperdicio).
6. Para algunos procesos, la corriente de gas ya está a alta presión (por consiguiente, las consideraciones de caída de presión no son significantes).
7. Capacidad para lograr alta eficiencia de recolección de partículas finas (sin embargo, a expensas de la caída de presión).

Desventajas

1. Puede crear problemas de eliminación del agua de desperdicio.
2. El producto es recolectado en húmedo.
3. Problemas de corrosión son más severos que con los sistemas secos.
4. Opacidad de la pluma de vapor y/o arrastre de gotas que pueden ser objetables.
5. La caída de presión y los requerimientos de potencia pueden ser elevados.
6. La acumulación de sólidos en la interfase húmeda-seca puede ser un problema.
7. Costos de mantenimiento relativamente altos.

8.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE FILTROS DE TELA

Ventajas

1. Eficiencia muy alta de recolección de partículas gruesas y finas (submicrónicas).
2. Relativamente insensible a las variaciones en la corriente de gas; la eficiencia y caída de presión casi no se ven afectadas por cambios grandes, en la carga de entrada de polvo, para filtros que se limpian continuamente.
3. En muchos casos, el aire que sale del filtro se puede recircular a la planta (para conservación de energía).
4. El material recolectado se recupera en seco, para su posterior procesamiento o colocación final.
5. No se tiene problemas de colocación final del líquido de desecho, la contaminación del agua, o la congelación del líquido.
6. Por lo general, la corrosión y oxidación de los componentes no son problema.
7. No hay peligro de alto voltaje, el mantenimiento y las reparaciones son sencillas y permiten la recolección de polvos inflamables.
8. El empleo de la ayuda de filtros fibrosos o granulares (precapa) permite una alta eficiencia de recolección de humos y contaminantes gaseosos submicrónicos.
9. Se dispone de filtros de bolsas en un gran número de configuraciones, lo que da por resultado una gran variedad de las bridas de entrada y salida, para adaptarse a los requerimientos de instalación.
10. Operación relativamente sencilla.



Desventajas

1. Las temperaturas que exceden 288°C (550°F) requieren material refractario especiales o telas metálicas que aún están en etapa de desarrollo y pueden ser costosas.
2. Ciertos polvos requieren posiblemente telas tratadas para reducir la filtración del polvo o, en otros casos, ayudar a la eliminación del polvo recolectado.
3. Las concentraciones de algunos polvos en el recolector ($\sim 50 \text{ g/m}^3$) constituyen un riesgo de incendio o explosión si penetran una chispa o llamas por accidente; existe la posibilidad de quemar las telas si se recolectan polvos fácilmente oxidables.
4. Requerimientos de mantenimiento relativamente altos (reemplazo de las bolsas, etc.)
5. A temperaturas elevadas se puede acortar la vida de la tela, así como en presencia de partículas ácidas o alcalinas o componentes gaseosos.
6. Los materiales higroscópicos, la condensación de humedad, y los componentes alquitranados adhesivos pueden causar el taponamiento o agrietamiento de la tela, o bien requerir aditivos especiales.
8. El reemplazamiento de las telas puede requerir protección respiratoria para el personal de mantenimiento.
9. Requerimientos intermedios de caída de presión, típicamente en el rango de 4 a 10 in H₂O.

8.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS

Ventajas

1. Eficiencia muy alta de colección de partículas (gruesas y finas), lograda con un gasto relativamente bajo de energía.
2. Recolección y colocación final en seco
3. Baja caída de presión (típicamente menor a 0.5 in H₂O).
4. Diseñados para operación continua, con requerimientos mínimos de mantenimiento.
5. Costo de operación relativamente bajo.
6. Capacidad para operar a altas presiones (hasta 150 lbf/in²) o al vacío.
7. Capacidad para operar a altas temperaturas [hasta 704° C (1300°F)].
8. Capacidad para manejar en forma eficiente velocidades de flujo de gas relativamente altos.

Desventajas

1. Altos costo de capital.
2. Muy sensibles a cambios en las condiciones de la corriente gaseosa (en particular, el flujo, la temperatura, la composición del gas y las partículas, y la carga de partículas).



3. Ciertas partículas son difíciles de recolectar, debido a características de resistividad relativamente altas o bajas.
4. Se requieren espacios relativamente grandes para su instalación.
5. Riesgo de explosión al recolectar partículas combustibles o tratar gases combustibles.
6. Se requieren medidas especiales de seguridad para proteger al personal del alto voltaje.
7. Durante la ionización del gas se produce ozono, por la descarga del electrodo cargado negativamente.
8. Se requiere personal de mantenimiento altamente capacitado.



CAPÍTULO IX

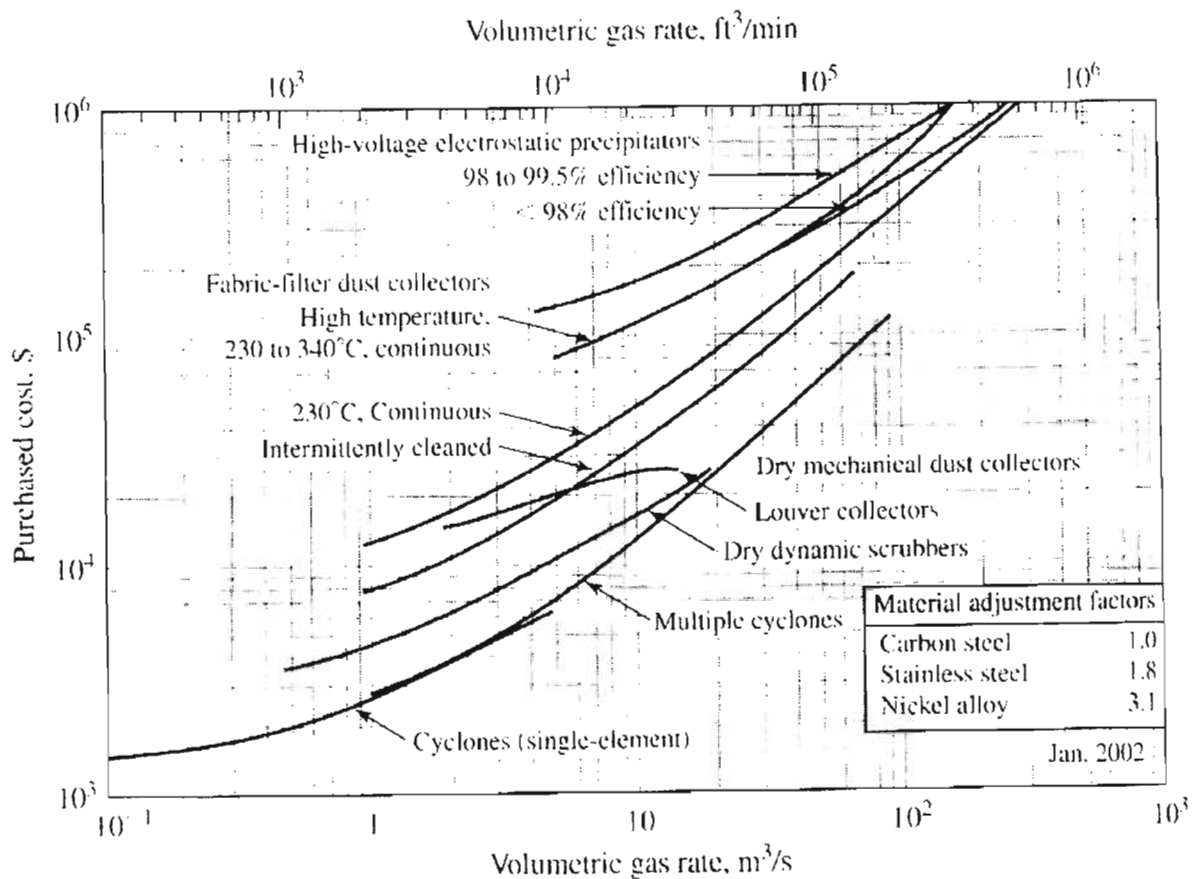
COSTO DE LOS EQUIPOS

CAPÍTULO IX. COSTO DE LOS EQUIPOS

El costo de los equipos se puede calcular por medio de las siguientes figuras.

9.1. COSTO DE COLECTORES MECÁNICOS, PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS DE ALTO VOLTAJE Y FILTROS DE BOLSA.

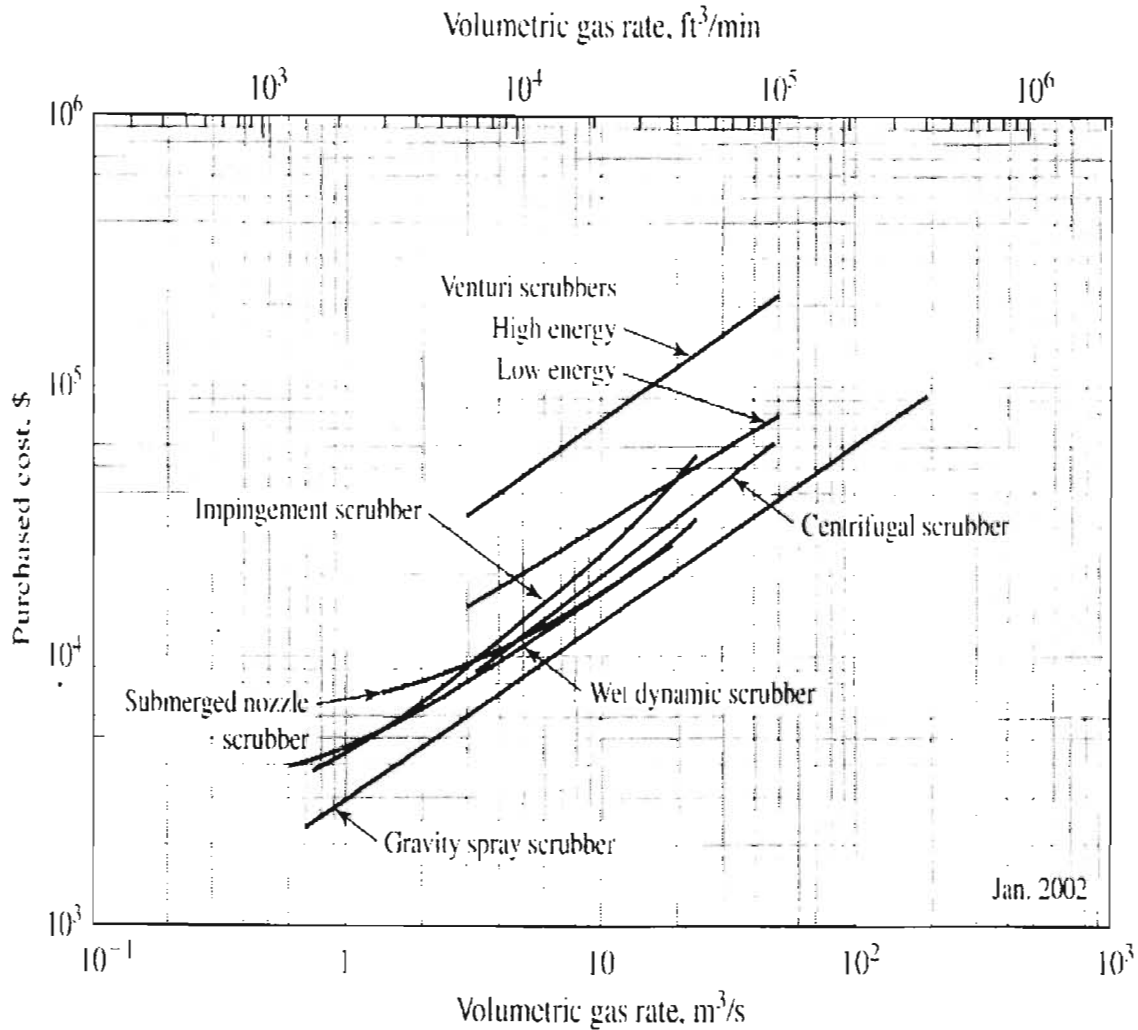
Figura 9-1. Costo de Colectores Mecánicos, Precipitadores Electroestáticos y Filtros de Bolsa



REF. (M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, R. E. West. PLANT DESIGN AND ECONOMICS FOR CHEMICAL ENGINEERS).

9.2. COSTOS DE COLECTORES HÚMEDOS

Figura 9-2. Costo de colectores húmedos

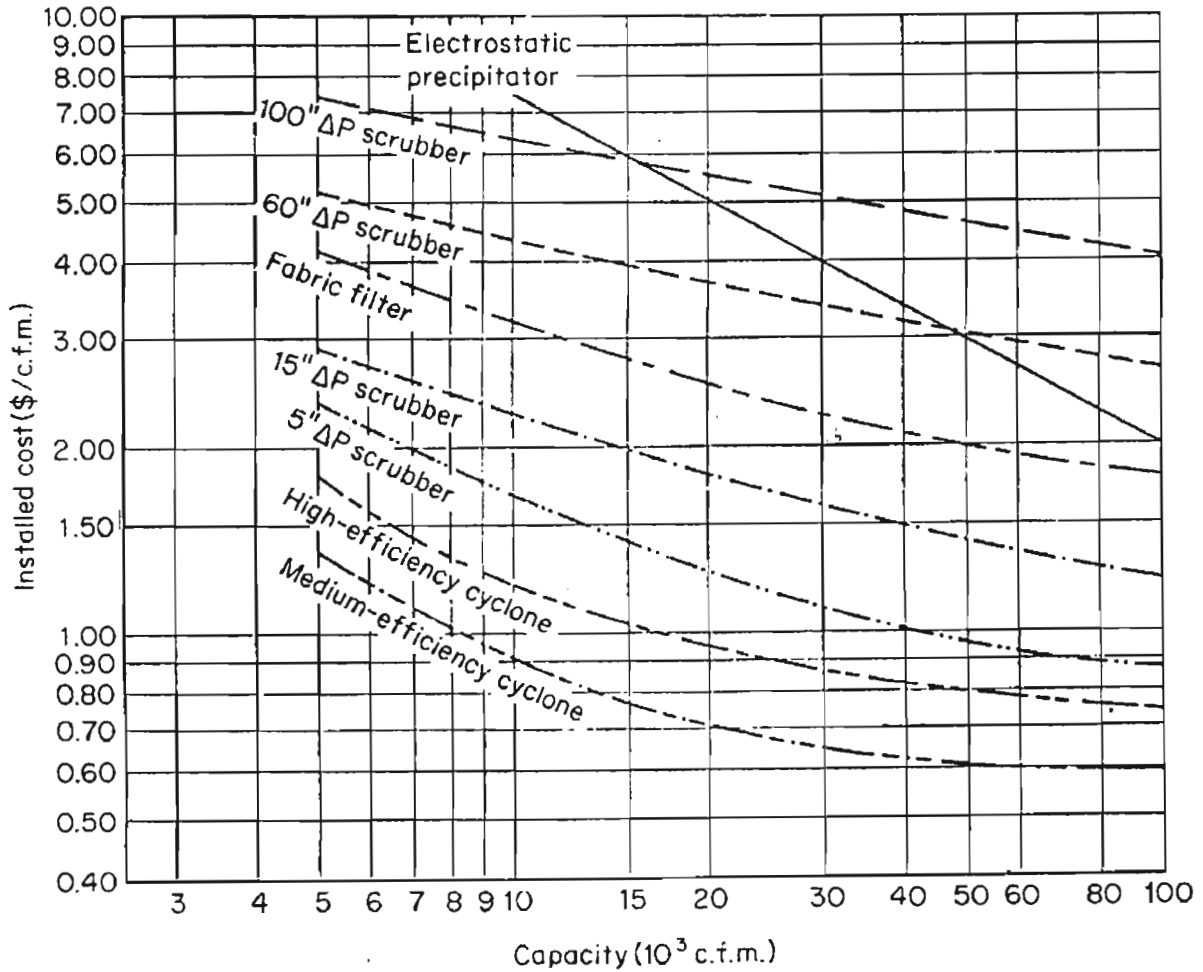


REF. (M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, R. E. West. PLANT DESIGN AND ECONOMICS FOR CHEMICAL ENGINEERS).



9.3. COSTO TOTAL INSTALADO PARA DISPOSITIVOS DE CONTROL DE PARTICULAS.

Figura 9-3. Costo total instalado para Dispositivos de Control de Particulas

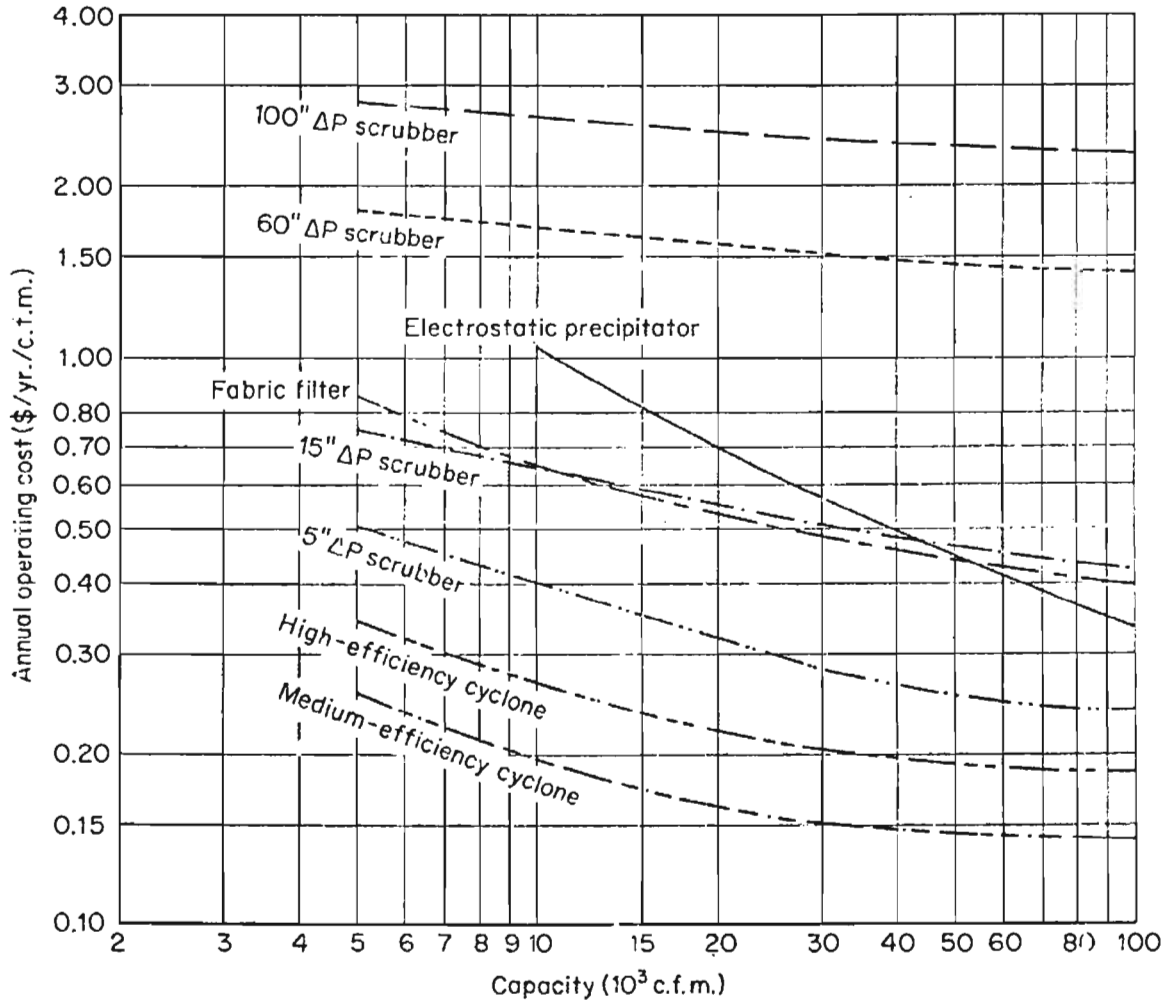


REF. (R. H. Perry, D. W. Green, J. D. Maloney. PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK).



9.4. COSTOS DE OPERACIÓN ANUALES PARA DISPOSITIVOS DE CONTROL DE PARTICULAS.

Figura 9-4. Costos de Operación Anuales para Dispositivos de Control de Partículas

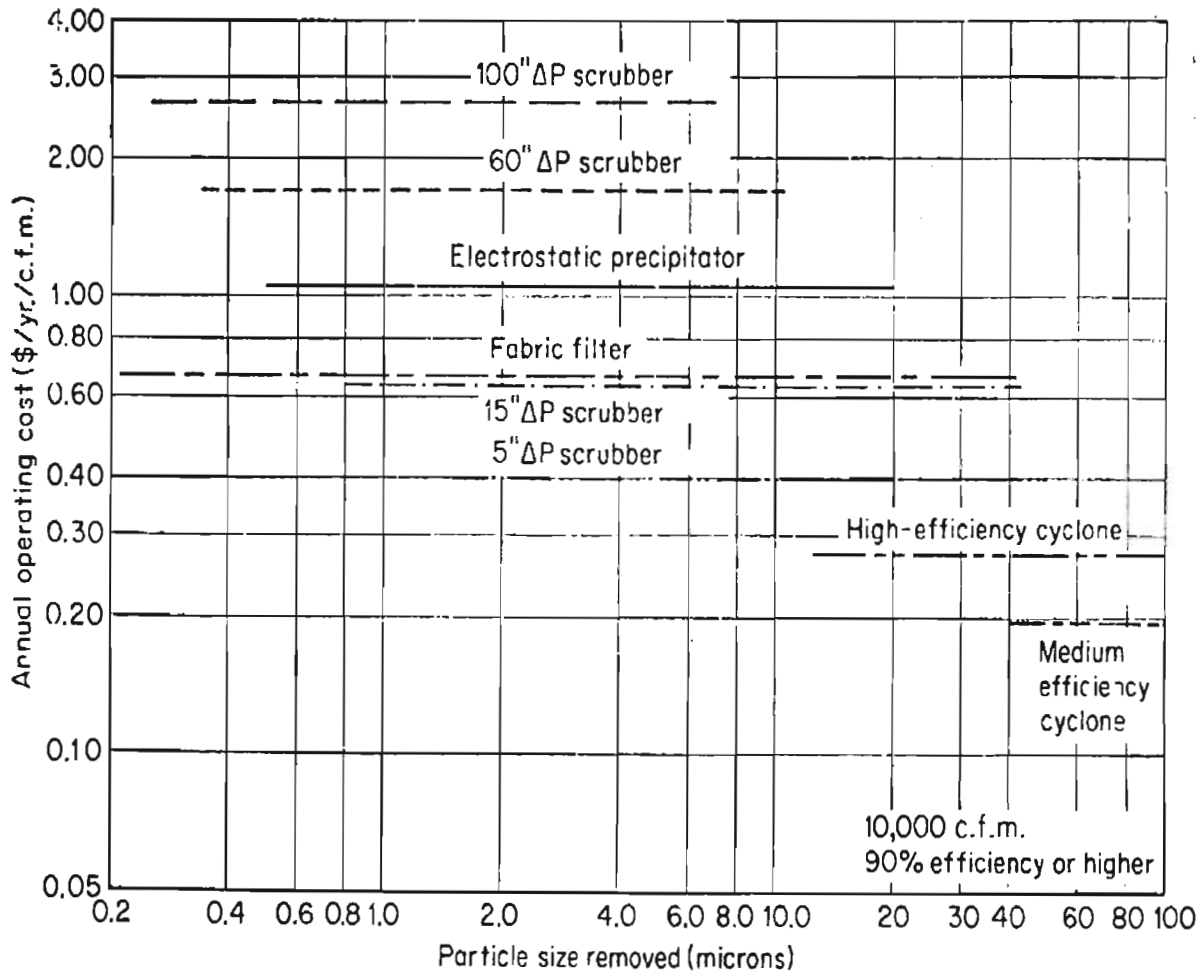


REF. (R. H. Perry, D. W. Green, J. D. Maloney. PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK).



9.5. COMPARACIÓN DE COSTO/EFICIENCIA PARA DISPOSITIVOS DE CONTROL DE PARTÍCULAS.

Figura 9-5. Comparación de Costo/Eficiencia para Dispositivos de Control de Partículas



REF. (R. H. Perry, D. W. Green, J. D. Maloney. PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK).

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA



CAPÍTULO X.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



CAPÍTULO X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En conclusión el control es aquel que se añade a los procesos que generan contaminación con el fin de destruir o capturar los contaminantes. La técnica a elegir para llevar a cabo el control de la emisión de los contaminantes de una determinada fuente depende de varios factores; el más importante es si el gas contaminante es un gas o una partícula.

Los principales dispositivos para el control de las emisiones de partículas son.

1. Cámaras de sedimentación
2. Colectores mecánicos (ciclones)
3. Colectores húmedos (scrubbers)
4. Filtros de bolsa (casas de bolsa)
5. Precipitadores electrostáticos

Todos estos se usan para controlar las emisiones de una variedad de procesos, con el procedimiento de selección casi siempre se dicta por la experiencia.

En términos de colección de partículas, hay varios principios físicos básicos, y son empleados en la operación de varios tipos de colectores:

- Sedimentación por gravedad
- Fuerzas inerciales
- Filtración
- Atracción electrostática
- Aumento del tamaño de la partícula

Características de la partícula tal como tamaño, forma y densidad debe ser considerado cuando se diseñan los sistemas para el control de la contaminación atmosférica.

A continuación se dan las recomendaciones para usar los diferentes equipos de control de partículas.

Cámaras de sedimentación.

- (a) se requieran coleccionar partículas entre 40 - 100 μm de diámetro
- (b) no se desea la clasificación de las partículas

Ciclones.

- (a) se requieran coleccionar partículas entre 15 - 100 μm de diámetro
- (b) las concentraciones sean bastantes altas
- (c) se desea la clasificación de las partículas
- (d) no se requiera una eficiencia muy alta

*Colectores húmedos.*

- (a) sea necesario eliminar partículas finas a una eficiencia relativamente alta
- (b) sea deseable el enfriamiento y no sea indeseable la humedad
- (c) los gases sean combustibles
- (d) sea necesario eliminar los contaminantes tanto gaseosos como partículas

Filtros de tela.

- (a) se requieran eficiencias muy altas
- (b) se requieran coleccionar materiales secos de valor comercial
- (c) el gas éste siempre por arriba del punto de rocío
- (d) los volúmenes sean razonablemente bajos
- (e) las temperaturas sean relativamente bajas

Precipitadores electrostáticos.

- (a) se requieren eficiencias muy altas para la eliminación de polvos finos (0.01 μm)
- (b) se deban manejar volúmenes de gas
- (c) sea necesario recuperar materiales valiosos sin modificaciones físicas.

Se presenta una tabla con diferentes aplicaciones de los equipos de control para diferentes Industrias o Procesos.

Tabla 10.1. Resumen y control de los procesos industriales.

<i>Equipos de control</i>	<i>Industria o Proceso</i>
Cámaras de sedimentación	(remoción de polvos producidos por trituración en) Hornos de cemento y cal, Silos de grano, Trituradores de rocas, Operaciones de molienda, Secadores de carbón térmicos.
Ciclones	(remoción de polvos producidos por trituración en) Hornos de cemento y cal, Silos de grano, Trituradores de rocas, Operaciones de molienda, Procesamiento de granos, Secadores de carbón térmicos, Fabricación de detergentes.
Colectores húmedos	Fabricas de hierro y acero, Fundición de hierro gris, Refinerías de petróleo, Fábrica de papel Kraft, Minería, Procesos químicos, Calderas industriales, Industria alimenticia, Plantas de ácido.
Filtros de tela	Cenizas volantes de gases, Calderas de carbón para producir energía para los servicios auxiliares, Remoción de polvos para materiales de construcción, Procesamiento de granos, Polvos en la fabricación de jabón, Polvos químicos, Procesamiento de comida seca, Recuperación de polvos metálicos
Precipitadores electrostáticos	Plantas de energía para remover cenizas volantes, Polvo de los hornos de cemento, fumos de la fundición de plomo, Manufactura de ácidos- fosfórico, sulfúrico, Fábrica de papel Kraft, Cemento Pórtland, Fabricas de hierro y acero.



GLOSARIO



GLOSARIO

Absorción. La transferencia de moléculas del volumen del gas a una superficie líquida, seguido por difusión de estas moléculas en el volumen del líquido.

ACFM. El acrónimo para pies cúbicos por minuto reales, que es la velocidad de flujo de gas real expresado en el Sistema de Unidades de Ingeniería Americano. ACFM es una medida del volumen del gas que pasa en un punto dado durante un periodo de un minuto.

Adsorción. El proceso por el cual los compuestos en la fase de vapor en la corriente de gas pasa a través de un lecho o capa de material altamente poroso (adsorbente). Los compuestos de la fase de vapor se difunden en la superficie del adsorbente y se retienen debido a fuerzas atractivas débiles.

Aerosol. Son pequeñas gotas que se forman por atomización de líquidos, como es el caso de los herbicidas y pesticidas. Los aerosoles tienen un tamaño entre 10 y 1,000 μm .

Arrastre. El proceso en que el material, tal como gotas de agua o partículas, se recogen y son llevadas por un gas o una corriente líquida.

Caída de presión. Una medida de la resistencia que la corriente de gas encuentra cuando fluye a través de un dispositivo de control de aire o a otra pieza del equipo.

Casa de bolsa. Este término se usa a menudo intercambiamente con el término "sistemas de filtración." Sin embargo, sólo es aplicable a sistemas de pulso de inyección, cartuchos, aire invertido, y de filtración por agitación.

Cenizas volantes. Son las partículas no combustibles muy finas que se tienen en los efluentes gaseosos de la combustión del carbón. Estas cenizas tienen características similares con los tres tipos anteriores. En efecto como el polvo, tienen un tamaño entre 1 y 1,000 μm , al igual que el humo son producto de una combustión y, como los fumos son sustancias inorgánicas de metales. Las cenizas se componen principalmente, de óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio. Además de los efectos estéticos, provocan suciedad y abrasión en las construcciones. La porción más fina es muy difícil de remover y entran fácilmente en los pulmones provocando enfermedades.

Colector húmedo. Un recipiente usado para remover contaminantes de una corriente de gas por medio de un rocío de líquido, inyección de líquido, o capa líquida.

Colector húmedo de lecho empacado. Un tipo común de absorbedor de gas en el que líquido depurador se dispersa encima de columnas empacadas que contienen material de empaque. Este diseño proporciona un área de superficie grande para el contacto de gas-líquido.



Colector Venturi. Un tipo de colector húmedo que es altamente eficiente pero requiere una gran cantidad de energía para operar. En los colectores venturi, un líquido depurador se introduce en la corriente de gas, el cual pasa a través de un área restringida del colector a una velocidad alta que crea una alta dispersión de gotas finas. Estas gotas finas capturan los gases y partículas contaminantes.

Condiciones normales. La SEMARNAP define las condiciones normales de temperatura y presión como (25°C y 1 atm).

Diámetro aerodinámico. El diámetro de una partícula esférica que tiene una densidad de 1 gm/cm³, que tiene las mismas propiedades inerciales (es decir, velocidad de sedimentación) en el gas como la partícula de interés.

Difusión. Un proceso por el que las moléculas de dos o más sustancias se mezclan gradualmente como resultado del movimiento aleatorio térmico.

Eficiencia de colección. Una proporción de contaminantes que entran en un dispositivo de control contra los contaminantes que dejan el dispositivo expresado como un porcentaje.

Eliminador de niebla. Un componente que pasivamente remueve la mayoría de las gotas de agua de una corriente de gas.

Filtro de tela. Un dispositivo de filtración que usa una o más bolsas filtrantes, láminas, o paneles para remover partículas de una corriente de gas.

Filtro de tela por pulso de inyección. Un tipo de sistema de filtración que usa un pulso de aire comprimido de corta duración inyectado en el "extremo limpio" del filtro, para limpiar en forma rutinaria la media filtrante. Los pulsos de inyección son uno de los tipos más comunes de sistemas de filtración.

Fumos. Son partículas sólidas finas, generalmente de óxidos metálicos de Zn y Pb, que se forman por la condensación de los vapores de sólidos, es decir, por procesos como sublimación, destilación, calcinación y fundición. Miden entre 0.03 y 0.3 µm. Los fumos deben ser tratados mediante floculación o coalescencia antes de poder ser separados por sedimentación.

Higroscópico. Caracterizado por que fácilmente absorbe humedad.

Humo. Son partículas sólidas muy finas que resultan de la combustión incompleta de sólidos orgánicos como carbón, maderas y tabaco. Tienen diámetros que se sitúan en el intervalo de 0.5 a 1 µm.



Impactador de cascada. Un dispositivo de muestreo usado para determinar la distribución de tamaño de partícula. Las partículas se separan y se depositan en una serie de etapas que corresponden a diferentes diámetros aerodinámicos.

Impacción inercial. El proceso en el que una partícula se mueve en una corriente de gas chocando ligeramente con obstáculos que se mueven o están estacionarios (ejemplo, gotas de líquido) directamente en su camino.

Intercepción. El proceso en el que una partícula se mueve en una corriente de gas se contrarresta ligeramente al impactar directamente un obstáculo estacionario o blanco. Cuando la partícula intenta moverse más allá del obstáculo, el obstáculo intercepta (y colecta) la partícula.

Líquido depurador. Un líquido usado para remover partículas o gases contaminantes por absorción o reacción química a través del contacto con la corriente de gas.

Manómetro. Un instrumento usado por medir la presión de líquidos y gases.

Niebla. Son pequeñas gotas que se forman por condensación de un vapor, dispersión de un líquido o como producto de una reacción química. La niebla tiene un tamaño, por lo general, inferior a 10 μm .

Número de Reynolds (Partícula). Un número adimensional que corresponde a la proporción de la fuerza inercial de una partícula a la fuerza viscosa del fluido circundante en un sistema de flujo. Se usa como un índice para la turbulencia.

Partículas. Cualquier material, excepto agua no combinada, que existe en estado sólido o líquido en la atmósfera o en una corriente de gas en condiciones normales.

Partículas finas. la clasificación de EPA de partículas que tienen diámetros aerodinámicos mayor que 0.1 micrómetro y menor que o igual a 2.5 micrómetros.

Polvo. Son partículas sólidas pequeñas (de 1 a 1,000 μm), que se forman por el rompimiento de partículas mayores en procesos como molienda, cribado o explosiones. Generalmente, se forman en las industrias donde se manejan carbón, cemento o granos. Su desplazamiento no se realiza por difusión sino por medio de corrientes de aire mientras se encuentren en suspensión.

Precipitador electrostático. Un tipo de sistema de control de contaminación de que usa campos de alto voltaje para cargarse eléctricamente y coleccionar partículas. Las partículas cargadas se acercan una placa de colección eléctricamente conectada a tierra y se acumulan como una capa del polvo, la cual es parcialmente removida por vibración mecánica (martillos) en una base rutinaria.



Presión estática. Una medida de la resistencia del flujo de aire a través de un sistema.

Presión manométrica. La presión relativa dentro de un recipiente o contenedor (la diferencia entre la presión interior y presión atmosférica).

Punto de rocío. La temperatura a la cual la presión parcial de una sustancia (en forma de vapor) es igual a la presión de vapor de equilibrio de la sustancia. A esta temperatura, un vapor empieza a condensar a una presión constante.

SCFM. El acrónimo para los pies cúbicos estándar por minuto, la cual es la velocidad de flujo de gas en las condiciones estándar (68° F y 14.7 psia) expresado en el sistema de Unidades de Ingeniería Americano.

Separador ciclónico. Un colector mecánico que usa fuerza centrífuga para dirigir las partículas a la pared del dispositivo.

Tiempo de residencia (o Tiempo de tratamiento). El tiempo que los contaminantes residen en el sistema de control de contaminación del aire. El tiempo del tratamiento es calculado dividiendo el volumen del aire del dispositivo de control por la velocidad de flujo del gas.

Tolva. Un dispositivo para almacenar temporalmente polvo colectado por un dispositivo de control de contaminación del aire.

Transferencia de masa. Un fenómeno natural en el que un componente viaja de una región de alta concentración a una de baja concentración para minimizar diferencias de concentración en una mezcla.

Velocidad de flujo (real o actual). El volumen de gas que mueve a través de un sistema por unidad de tiempo expresado a las condiciones reales de temperatura y presión.

Velocidad terminal de sedimentación. La velocidad de una partícula cayendo cuando la fuerza gravitatoria se equilibra con la fuerza de resistencia del aire (o de arrastre) que asciende.

Velocidad de flujo (estándar). El volumen de gas que mueve a través de un sistema por unidad de tiempo expresado a las condiciones estándar de temperatura y presión.



BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

1. Anthony J. Buonicore, Wayne T. Davis. AIR POLLUTION ENGINEERING MANUAL. Van Nostrand Reinhold. New York. U. S. A. pp. 6-8, 71-92, 114-129. 1992.
2. Arthur C. Stern. AIR POLLUTION. 3a. Vol. IV. Academic Press. Reino Unido. Londres. pp. 98-115, 140-141, 150-182, 191-243, 259-288. 1977.
3. W. Strauss, S. J. Mainwaring. CONTAMINACIÓN DEL AIRE. (Causas, Efectos y Soluciones). Trillas. México D. F. pp. 111-119. 1990.
4. Blanca Elena Jiménez Cisneros. LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN MÉXICO. (Causas, Efectos y Tecnología apropiada). Limusa, México, D. F. pp. 346-347, 378-393. 2002.
5. Juan A. Del Giorgio. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA. (Métodos de medida y Redes de vigilancia). Alhambra. España. Pp. 1-9. 1977.
6. R. H. Perry, D. W. Green, J. D. Maloney. PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK. 5ª. McGraw-Hill. U. S. A. pp. 20-120, 20-121. 1975.
7. R. H. Perry, D. W. Green, J. D. Maloney. PERRY MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO. 6ª. McGraw-Hill. México. pp. 26-22, 26-23. 1992.
8. M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, R. E. West. PLANT DESIGN AND ECONOMICS FOR CHEMICAL ENGINEERS. 5ª. McGraw-Hill. New York. U. S. A. pp. 868-869. 2003.
9. D. S. Beachler, J. A. Jahnke, G. T. Joseph, M. M. Peterson. AIR POLLUTION CONTROL SYSTEMS FOR SELECTED INDUSTRIES - SELF-INSTRUCTIONAL GUIDEBOOK. APTI Course SI:431, EPA 450/2-82-006. 1983.
10. R. T. Barrera. DIPLOMADO EN PROTECCIÓN AMBIENTAL. (Equipos de Control de Emisiones Contaminantes Atmosféricas para Procesos Industriales). Junio 2004.
11. D. S. Beachler, J. Joseph, M. Pompelia. FABRIC FILTER - SELF-INSTRUCTIONAL MANUAL. APTI Course SI:412A, EPA CT-901889. 2a. North Carolina State University. U. S. A. 1995.
12. Gerald T. Joseph, David S. Beachler. SCRUBBER SYSTEMS - SELF-INSTRUCTIONAL MANUAL. APTI Course SI:412C, EPA CT-902765. 2a. U. S. A. 1998.



13. W. H. Koch, W. Licht. NEW DESIGN APPROACH BOOSTS CYCLONE EFFICIENCY. Chemical Engineering. Noviembre 7. Pp.80-88. 1977.
14. H. F. David, B.G. Lipták. AIR POLLUTION. Lewis Publishers. U. S. A. pp. 113,114,121, 123,130, 138. 2000.
15. J. S. Nancy. INDUSTRIAL POLLUTION CONTROL: Issues and Techniques. 2a. Van Nostrand Reinhold. New York. U. S. A. pp. 39, 41-42, 45, 47, 52, 54, 60. 1992.
16. K. Wark, C. F. Warner. CONTAMINACIÓN DEL AIRE. Origen y Control. Limusa. México, D. F. pp. 193-196, 200-202, 219-222, 233-238, 242-248, 252-267, 270-277, 282-288, 300-302.1997.
17. J. M. Marchello, J. J. Kelly. Gas Cleaning for Air Quality Control. INDUSTRIAL AND ENVIROMENTA HEALTH AND SAFETY REQUIREMENTS. Marcel Decker Inc. New Cork. U. S. A. 1975.
18. a. s. Foust, L. A. Wenzel. Et al. PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS. 2ª . Cia. Editorial Continental. pp. 611-617, 619-621. 1987.