

9. Control de la contaminación del aire

Se dice que el aire se encuentra contaminado, cuando en él existen sustancias o energía que pueden alterarlo y ocasionar efectos sobre seres humanos, animales, vegetación y materiales diversos.

RELACION ENTRE EMISIONES ATMOSFERICAS Y CALIDAD DEL AIRE EN EL LUGAR DE TRABAJO

El concepto básico y el denominador común para iniciar el control de la contaminación del aire y de los riesgos ocupacionales en los sitios de trabajo, es la identificación de su origen. A partir de esta base, pueden considerarse dos categorías generales: con o sin descarga en la atmósfera.

Operaciones que descargan directamente en la atmósfera

Cuando una operación o proceso industrial descarga directamente a la atmósfera, por ejemplo, un horno metalúrgico, la calidad del aire en el lugar de trabajo puede alterarse por el diseño y la eficiencia del sistema de ventilación. Una campana de diseño inadecuado, o que succiona un volumen de aire menor al recomendado, contaminará el ambiente y afectará a los trabajadores en la vecindad del horno. Este ejemplo permite plantear la estrecha relación que existe entre emisiones atmosféricas y exposición ocupacional.

Operaciones que descargan indirectamente en la atmósfera

En determinadas circunstancias, la emisión al exterior, de los materiales generados por un proceso, se presenta tras la dispersión de los contaminantes por toda el área de trabajo, seguida de su descarga en la atmósfera a través del sistema de ventilación general, natural o mecánico, la salida por ventanas, puertas y otras aberturas existentes en la edificación.

Recirculación del aire

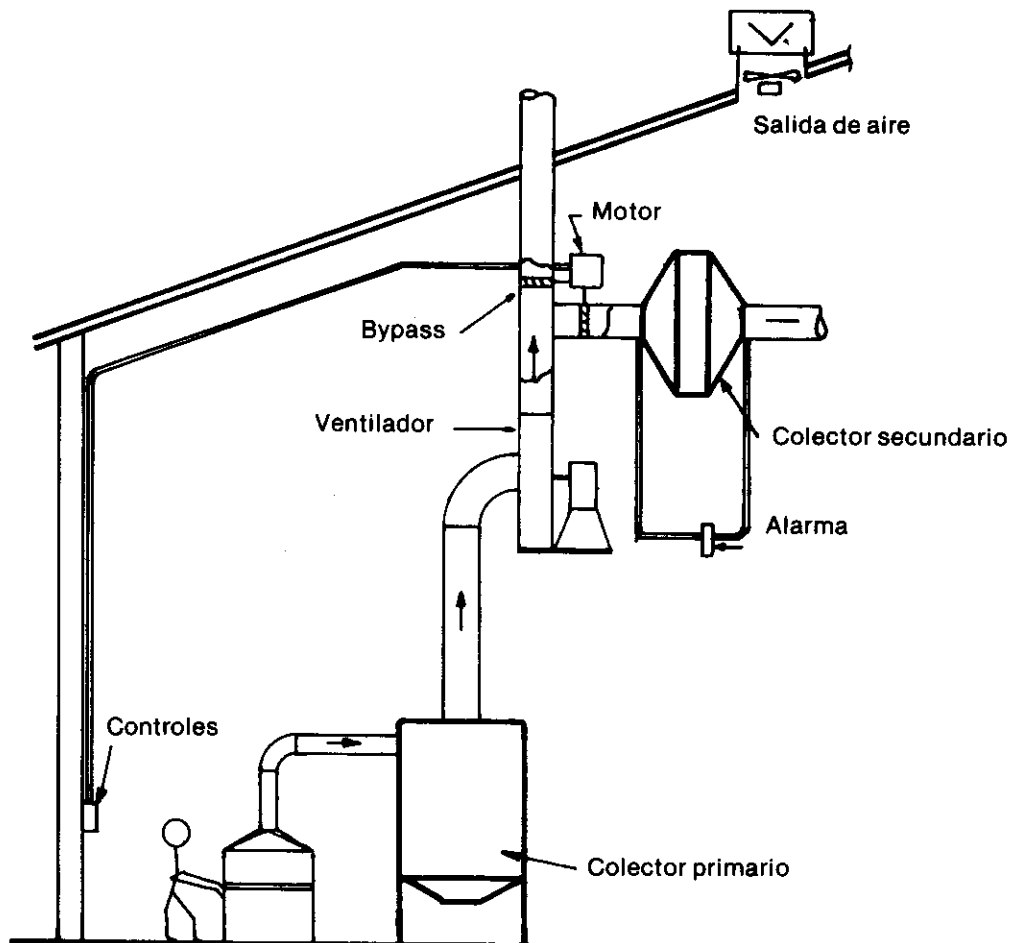
Cuando se retiran grandes cantidades de aire en un local de trabajo con objeto de remover polvos, gases, humos o vapores, es necesario suministrar una cantidad equivalente de aire fresco y limpio.

Desde el punto de vista de la higiene industrial, se ha instituido la política de no practicar la recirculación del aire que se descarga o se succiona, especial-

mente si el contaminante que contiene puede afectar la salud de los operarios. Aunque el equipo de limpieza de aire que se emplee, sea de eficiencia adecuada y suficiente, un mantenimiento o una operación incorrectos, lo cual ocurre con relativa frecuencia, pueden ocasionar el retorno del aire contaminado. No obstante, en algunos casos la recirculación de aire es el único método de control factible (figura 9.1). Esta recirculación puede permitirse en los siguientes casos.

Figura 9.1

Sistema de limpieza de aire con equipo monitor



- Cuando exista un sistema primario de limpieza del aire y éste proporcione una concentración del agente a la salida (suministro de aire al sitio de trabajo), inferior al valor límite permisible del contaminante.
- Cuando se emplee un sistema secundario, de igual o mayor eficiencia que el primario, instalado en serie; o cuando se utilice un equipo de monitoreo que mida el aire de salida del sistema primario (aire en recirculación).
- Cuando se disponga de una señal que indique la presencia de concentraciones superiores a los límites permisibles.

Para fijar condiciones de equilibrio, la concentración permisible de contaminante del aire en circulación puede calcularse mediante la siguiente ecuación.

$$C_R = \frac{1}{2} (VLP - C_o) \frac{Q_T}{Q_R} \times \frac{1}{K}$$

donde:

C_R = concentración del contaminante en el aire de salida del sistema colector, antes de mezclarse (aire recirculante).

VLP = valor límite permisible de contaminante en el aire.

C_o = concentración del contaminante en la zona de respiración del operario, sin recirculación de aire.

Q_T = caudal total de ventilación a través del espacio afectado.

Q_R = flujo de aire recirculado.

K = factor de efectividad de mezcla, de 3 a 10.

CONTROL DEL PROCESO Y DEL SISTEMA DE PRODUCCION

El control del proceso implica revisar cuidadosamente la unidad de producción, a fin de reducir la contaminación del aire e inspeccionar si el proceso de producción y el caudal de la emisión son óptimos, como también el control y tratamiento necesarios para las emisiones del proceso. Un principio fundamental para lograr el control de la contaminación del aire, establece que el

problema puede resolverse en mejor forma si éste se soluciona desde el sitio de origen de las emisiones.

Métodos para el control en el origen

Los métodos para el control, total o parcial, en el origen, incluyen: la eliminación o la reducción de las emisiones y de la concentración del contaminante, antes de la descarga.

Eliminación de emisiones

La sustitución de materiales, procesos o equipo, es el método menos costoso y más positivo.

— Sustitución del combustible

Consiste en el uso de un combustible limpio en lugar de uno sucio: como el caso del carbón por gas, en las calderas. Existen disposiciones legales que limitan las emisiones del dióxido de azufre del carbón y del aceite que se queman en las plantas de energía; al respecto, la tendencia es utilizar carbón y aceite con un contenido bajo de azufre o un combustible más limpio, como el gas natural. Sin embargo, no siempre es posible emplear combustibles de tales características, por su elevado costo.

— Cambios en el proceso

Pueden ser efectivos para la eliminación de emisiones contaminantes del aire. En las industrias química y del petróleo, el control de materiales orgánicos volátiles en la atmósfera se realiza por condensación y reutilización de los vapores. Asimismo, en la fundición de latón una práctica común para reducir las emisiones atmosféricas consiste en la aplicación de material fundente sobre la superficie del metal fundido, consiguiéndose que actúe como una barrera que evita la evaporación y reduce la producción de humos de latón.

— Sustitución de equipo

Ejemplo ilustrativo es la tendencia, en la industria del cloruro de polivinilo de utilizar reactores de polimerización más amplios o más grandes, con lo cual se mejora no sólo la producción, sino que también se ayuda a reducir las fugas del monómero de cloruro de vinilo. Los reactores amplios tienen solamente la mitad de los posibles puntos de escape, respecto a dos unidades más pequeñas pero de la misma capacidad total.

Reducción de emisiones

Emisiones por fugas. El escape, en sistemas de transporte, puede reducirse si se eliminan los derrames y la dispersión de material mediante cubiertas herméticas construidas alrededor de los transportadores. En efecto, los tanques y los depósitos podrían disponer de cubiertas y de sellos con tiras de plástico o láminas de caucho que se peguen en las uniones. Por otra parte, cada depósito o tanque deberá tener sólo una salida, especialmente en lugares donde la diferencia de temperatura pueda crear corriente o succión desde aquélla; las demás aberturas deben mantenerse cerradas.

En algunos casos, cabe considerar la interconexión de una serie de salidas de varios tanques; así, mientras uno se llena el otro puede estar vacío, reduciéndose de esta manera la necesidad de descargar aire contaminado en la atmósfera. Esto es factible si se dispone de un pequeño colector de polvo que sirva a cierto número de unidades.

Emisiones del proceso. Cuando los contaminantes son un subproducto de las operaciones del proceso, pueden disminuirse mediante cambios en las condiciones del mismo; verbigracia, los óxidos de nitrógeno se reducen con bajas temperaturas de combustión; asimismo, evitar el exceso de aire en las calderas de carbón o petróleo merma considerablemente la conversión de dióxido de azufre en trióxido de azufre y, por tanto, la emisión de ácido sulfhídrico.

Concentración de contaminantes en el origen. Se logra por la centralización y disminución de los puntos de emisión y la reducción del volumen de gas que será descargado.

Reducción del número de puntos de emisión. El control de la exposición de los trabajadores a las emisiones que producen ciertas operaciones en industrias metalmeccánicas tales como pulido, sierra y corte, puede llevarse a cabo si se agrupan las operaciones y se practica una ventilación local exhaustiva con un sistema de recolección común, en lugar de utilizar un sistema de ventilación exhaustiva con un colector individual para cada operación. La recolección centralizada disminuye los costos por unidad de peso del material colectado.

Reducción del volumen por enfriamiento. Las dimensiones de colectores de polvo como filtros de tanga y precipitadores, generalmente toman en cuenta el flujo volumétrico y no el flujo de masa.

Si la emisión es de un gas caliente y polvoriento, el enfriarlo puede reducir su volumen apreciablemente. El método más económico consiste en la simple adición de aire frío.

Otros medios incluyen el intercambiador de calor, la convección forzada y el rociado con agua.

Ventilación local exhaustiva. Los sistemas de ventilación local exhaustiva, bien diseñados e instalados adecuadamente, constituyen un elemento importante en el propósito de reducir los caudales de aire succionado y para controlar al máximo la concentración de contaminantes, advirtiéndose que éstos deben sujetarse a limpieza antes de su descarga en la atmósfera. Las campanas de tales sistemas, bien construidas y ajustadas, logran una captura completa de los contaminantes dentro del ambiente de trabajo. La ventilación local exhaustiva es preferible a la ventilación general.

Un caso de reducción de los costos de operación y de inversión de capital es el que se refiere al incremento en la concentración del solvente por el empleo óptimo del sistema de ventilación local exhaustiva y la absorción de los vapores de aquél mediante un lecho de carbón. Concentraciones muy diluidas de solventes requieren grandes lechos de carbón activado, con relación a la cantidad de solvente recuperado por libra de carbón, debido a que la baja fuerza de conducción determina la cantidad de absorción para un solvente determinado. El costo inicial de inversión puede reducirse considerablemente, si se disminuye el volumen de aire utilizado para recoger y transportar los vapores del solvente producido durante el proceso. Esta disminución reduce también la cantidad de energía eléctrica que consumen los ventiladores, con el resultado de requerirse equipos más pequeños.

CRITERIOS TECNICOS PARA SELECCIONAR EQUIPOS DE LIMPIEZA DE AIRE

Rendimiento. El primer factor que se debe tomar en cuenta para la selección del equipo de control de contaminantes, es la cantidad máxima de éstos que puede descargarse en la atmósfera. A partir del conocimiento de tal cantidad y del contaminante que entra al sistema de colección propuesto, se define el nivel de eficiencia de recolección requerido.

Si el material recolectado se demenuza o "partícula", es importante tener presente que los colectores tienen eficiencias de acuerdo con el tamaño de las partículas. Esto significa que debe conocerse la dimensión de las partículas que se emiten, previamente a la determinación de la eficiencia requerida del colector, eficiencia que también varía con el caudal o flujo, así como con las propiedades del gas portador. Por otra parte, el tamaño, la forma y la densidad de las partículas influyen en la velocidad de sedimentación, en la selección del equipo colector, y en la facilidad para remover las partículas de una corriente de gas.

Cuando el material colectado es un gas o un vapor, se necesita saber si la sustancia es soluble en un líquido y si puede ser retenida por materiales absorbentes, además de considerar las concentraciones esperadas a la entrada y a la salida del colector, las condiciones de temperatura, la presión y el caudal de la corriente.

Propiedades del contaminante

- **Cantidad:** fluctúa con los ciclos de operación y con el caudal del gas portador.
- **Composición:** de la misma dependen las propiedades físicas o químicas del contaminante. El colector debe tener capacidad para hacer frente a los cambios de composición, esperados o inesperados.

La solubilidad es factor importante para regeneración del material absorbente y para la remoción, por lavado, del material "particulado".

- **Explosividad:** es inconveniente emplear un sistema colector que permita acumular contaminante, cuando éste sea explosivo o combustible. Si es el caso, los equipos deben protegerse contra la acumulación de carga estática. Los precipitadores electrostáticos no son convenientes, por su tendencia a la chispa; es más adecuada la recolección húmeda por métodos de lavado o absorción. No obstante, algunos polvos, como el magnesio, son pirofóricos en presencia de pequeñas cantidades de agua.
- **Reacción:** para la selección del equipo colector, es necesario considerar en qué medida reacciona el contaminante en presencia del medio filtrante o el material absorbente, así como su nivel de corrosividad.
- **Electricidad:** afecta tanto la eficiencia y el tamaño de los colectores, como la facilidad para remover la partícula acumulada por colección.
- **Toxicidad:** influye en los requerimientos de eficiencia del colector, en su sistema de mantenimiento y en la forma de remover el contaminante retenido en el colector.
- **Hidroscopia:** permite conocer la tendencia del contaminante a la acumulación en el equipo colector.
- **Aglomeración:** cuando se utilizan colectores en serie, generalmente el primer colector actúa como aglomerador y el segundo recoge las partículas aglomeradas.

Propiedades del gas portador

Composición: influye en las propiedades físicas y químicas y, por tanto, en las reacciones químicas que pueden ocurrir entre los contaminantes y el recolector.

La composición, la concentración y las propiedades químicas de la corriente de entrada, determinan la eficiencia de colección en las torres lavadoras para remover contaminantes gaseosos o vapores.

- **Temperatura:** influye en el volumen de los materiales de construcción del colector, en su tamaño y costo y en la concentración del contaminante por unidad de volumen. En adición, la densidad, la viscosidad y otras propiedades del gas dependen de la temperatura. Por otra parte, los gases a temperaturas bajas que fluyen por la chimenea de un equipo de control, se dispersan en menor proporción por la atmósfera, que los gases a altas temperaturas.
- **Presión:** no tiene gran importancia en la recolección de partículas; sin embargo, influye en la densidad, viscosidad y propiedades eléctricas del gas.
- **Viscosidad:** la movilidad de las partículas a través de la corriente de gas decrece con el aumento de viscosidad en tal corriente; aumento que influye, además, en la caída de presión en el colector, y por tanto, en el consumo de energía eléctrica.
- **Densidad:** influye en los requerimientos de potencia del ventilador, en su selección y en su costo de operación.
- **Humedad:** influye en la selección y en la eficiencia del equipo de control.
- **Combustible:** el manejo de un gas portador inflamable o explosivo requiere precauciones especiales, por lo cual es de fundamental importancia determinar los límites superior e inferior de inflamabilidad.
- **Toxicidad:** si es tóxico o irritante, habrán de tomarse precauciones en la construcción del colector y de la tubería, así como para descargarlo en la atmósfera. Todo el sistema —incluyendo la chimenea— debe estar bajo presión negativa y se adoptarán medidas de precaución durante las operaciones de mantenimiento del sistema de colector.
- **Electricidad:** es importante, en especial para los precipitadores electrostáticos, porque la facilidad de ionización influye en los mecanismos de recolección.
- **Reacción:** debe preverse su posibilidad ante el medio filtrante.

CLASIFICACION DE METODOS DE LIMPIEZA DEL AIRE

Indirectos

Comprenden la utilización de recursos y procedimientos que reducen, diluyen o evitan la dispersión de los contaminantes (figura 9.2). Son generalmente de implantación sencilla y barata, e incluyen:

— La delimitación del terreno o la zonificación:

Su objetivo principal es el distanciamiento entre fuentes y receptores, de tal forma que transcurra el suficiente tiempo para que, descargado el contaminante en la atmósfera, las condiciones meteorológicas se encarguen de diluir las emisiones.

A su vez, la zonificación puede incluir.

- prohibición de ciertas fuentes en determinadas áreas.
- establecimiento de franjas o zonas de protección sanitaria.
- limitación del número de fuentes contaminantes por unidad de superficie (terreno)
- aprovechamiento de condiciones meteorológicas apropiadas para la dispersión de contaminantes y fijación de periodos durante los cuales pueden realizarse determinadas actividades u operaciones.
- restricciones para el uso de ciertas materias primarias o combustibles, así como en cuanto a diversas operaciones y procesos industriales.

— La eliminación y reducción de fuentes de emisión, que comprende:

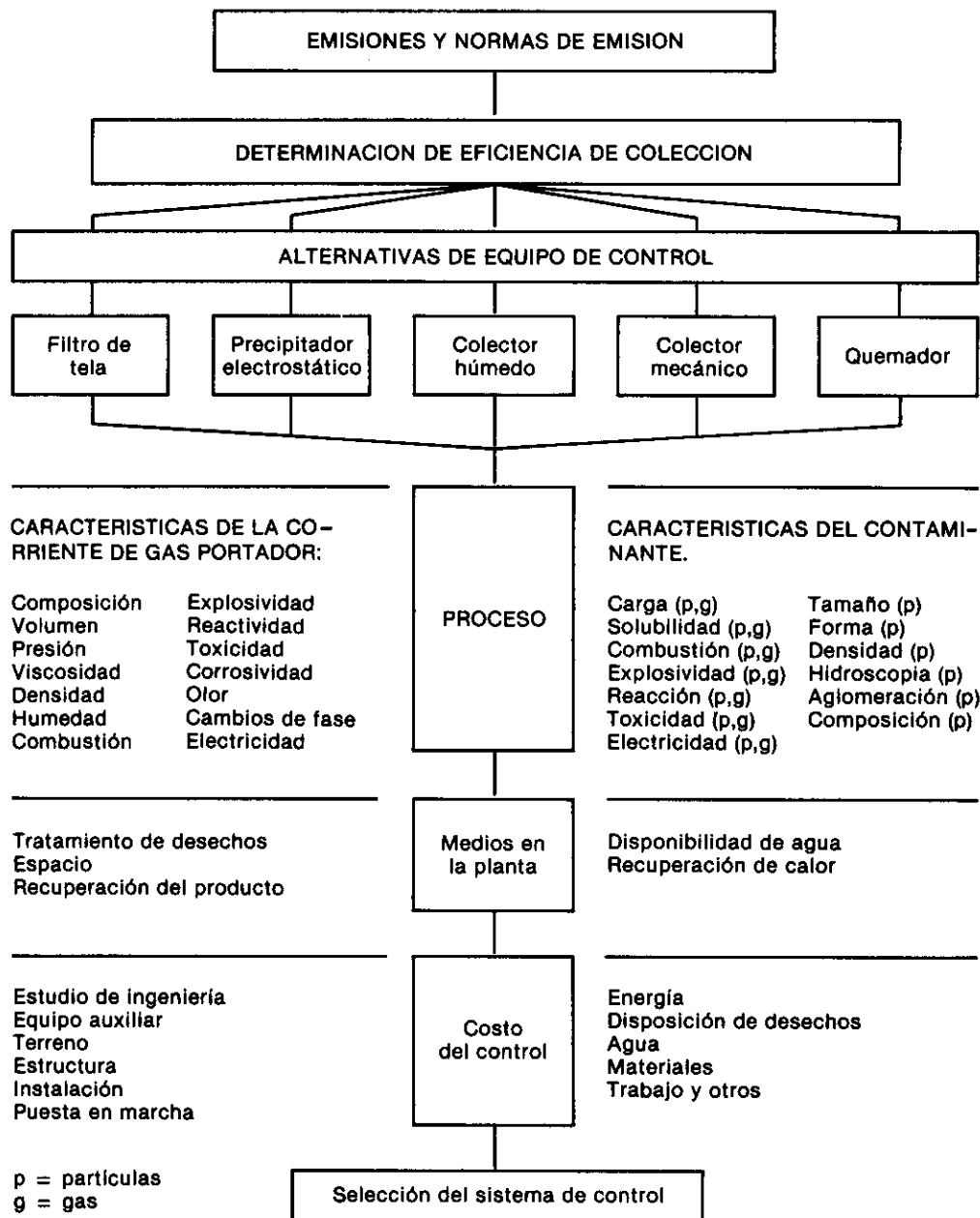
- obtención de energía por métodos menos contaminantes, como energía eléctrica o combustibles gaseosos y líquidos con bajo contenido de azufre.
- sustitución de ciertas materias primas, procesos y operaciones industriales.
- mantenimiento adecuado de los equipos.

— Dilución por chimeneas:

Se advierte que la eficiencia depende de su altura efectiva.

Figura 9.2

Proceso para la selección del equipo de control



— **Enmascaramiento:**

Es el método empleado para la eliminación de un determinado olor, mediante la introducción de una sustancia de otro olor más agradable.

Directos

Tienen por finalidad recolectar los contaminantes, para evitar su descarga directa en la atmósfera.

La selección del método para la limpieza del aire depende de:

- la naturaleza y concentración del contaminante.
- el tamaño de sus partículas.
- las características de la corriente de aire.
- las características del contaminante.
- los requerimientos de energía.
- el método de remoción y disposición del contaminante recolectado.

Los procedimientos para el control de agentes gaseosos son:

- combustión o incineración.
- absorción y lavado.
- adsorción.

Los métodos básicos para recoger y controlar los contaminantes “particulares” son:

- separación por inercia y gravedad (sedimentación), o colectores mecánicos.
- filtración.
- precipitación electrostática.
- lavadores o colectores húmedos
- sistemas combinados

CONTROL DE GASES Y VAPORES

Combustión o incineración. Los procesos pueden originar emanaciones gaseosas que contienen materiales orgánicos tóxicos, olorosos o de escaso valor comercial ser recuperados. En estos casos la oxidación térmica es un procedimiento adecuado, especialmente si los contaminantes son combustibles. Existen tres métodos de combustión: la oxidación térmica, la incineración por flama directa y la oxidación catalítica.

Para utilizar la oxidación térmica o la oxidación catalítica, es necesario que la concentración del contaminante combustible esté por debajo del límite inferior de explosividad.

Las cámaras de combustión térmica y de flama directa generalmente son de baja inversión, pero su operación presenta costos elevados. La combustión catalítica es de inversión alta, pero requiere cantidades menores de combustible.

Entre los procesos que utilizan el método de la combustión para controlar las emisiones de hidrocarburo, están los procesos de secamiento, secado de pinturas, aplicación de esmaltes, aplicación de revestimientos al papel, fabricación de tela, plástico, pinturas, barnices, químicos orgánicos y fibras sintéticas. También se ha empleado extensamente en plantas químicas y refinerías, como un método de disposición de desechos no útiles. En este caso debe tenerse cuidado especial, para evitar riesgos en la proximidades, si existen tanques de almacenamiento de líquidos inflamables, o inclusive en el proceso mismo.

Absorción y lavado. El proceso consiste en permitir el contacto íntimo de un gas o vapor con un líquido en el cual aquéllos son solubles. La transferencia de masa de gas hacia el líquido es proporcional a la solubilidad del gas en el líquido y a la diferencia de concentración.

Se emplea agua para remover gases muy solubles en ésta, como el fluoruro y el cloruro de hidrógeno. Pueden usarse soluciones caústicas o salinas para que tenga lugar una reacción química con el gas, por ejemplo, para remover cloro se utiliza una solución de hidróxido de sodio, produciéndose entonces hipoclorito de sodio.

La transferencia de masa se consigue mediante equipos donde el soluto (gas o vapor) se pone en contacto íntimo con el solvente o el líquido por ejemplo en torres empacadas, torres de rociado (spray), lavadores tipo venturi, y lavadores eyectores tipo orificio (figuras 9.3, 9.4, 9.5 y 9.6).

Figura 9.3
Torre empacada

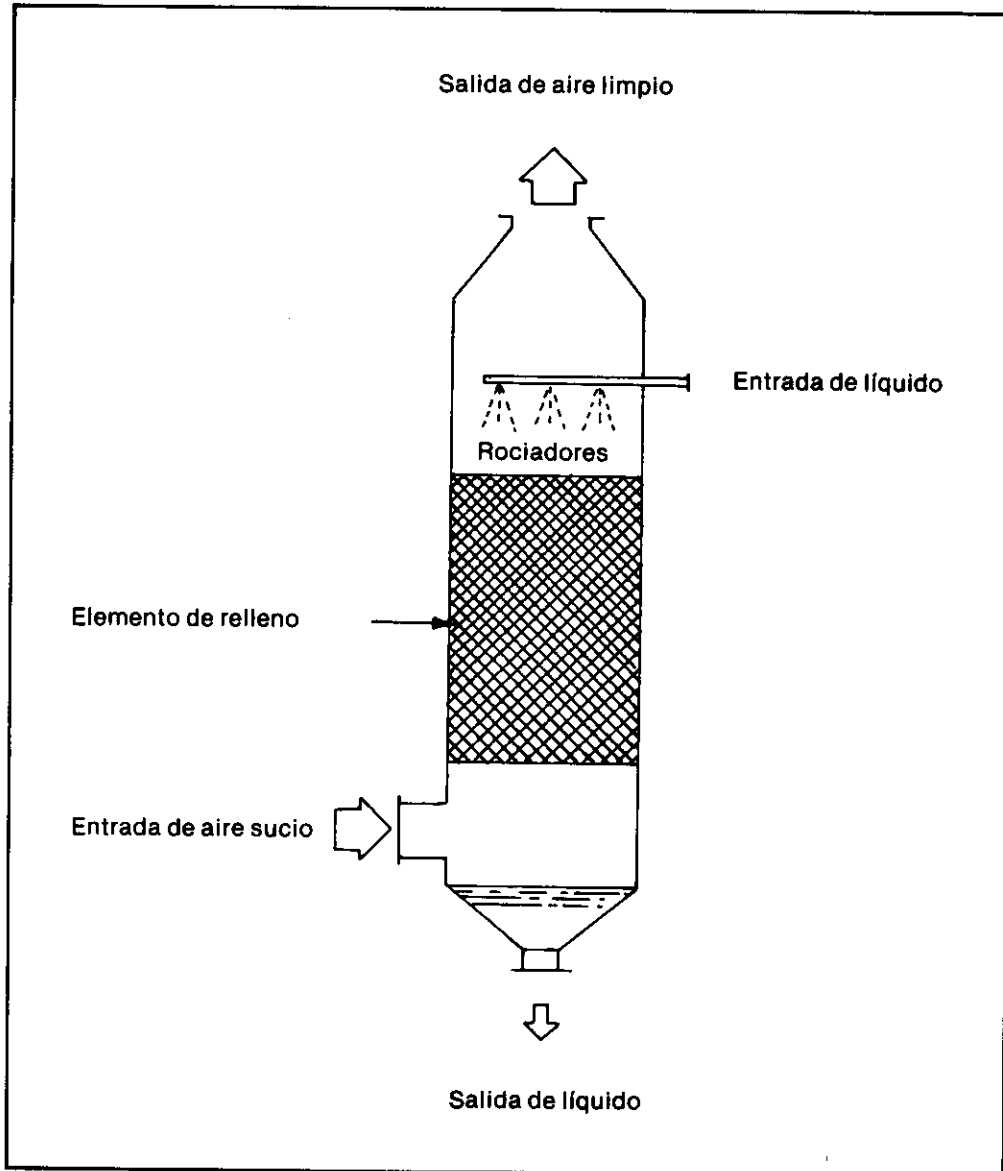


Figura 9.4
Torre rociadora

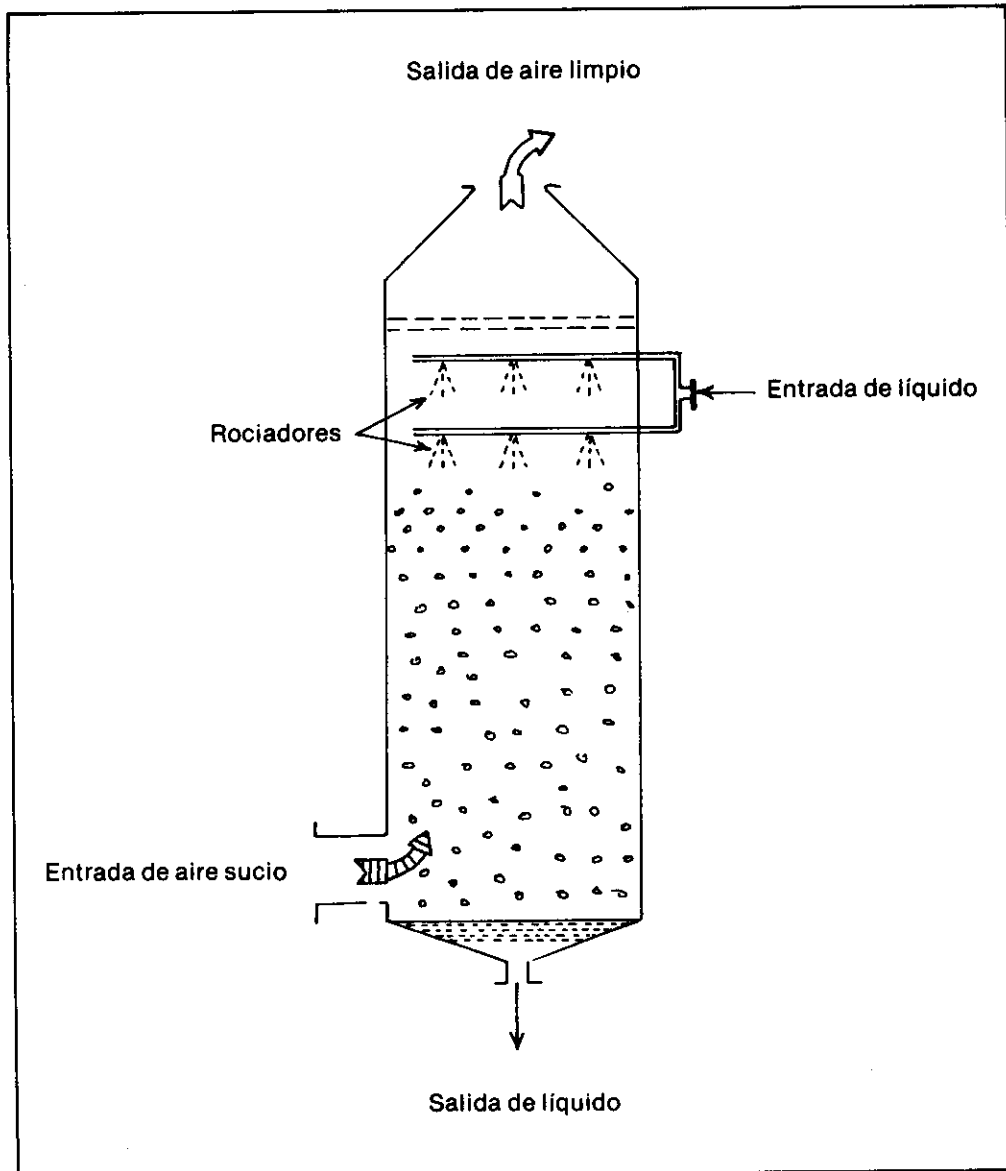


Figura 9.5

Lavador Venturi

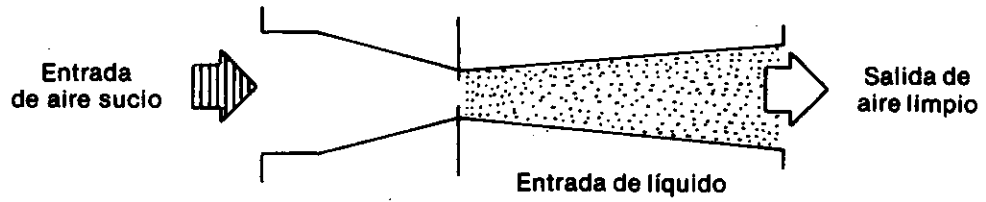
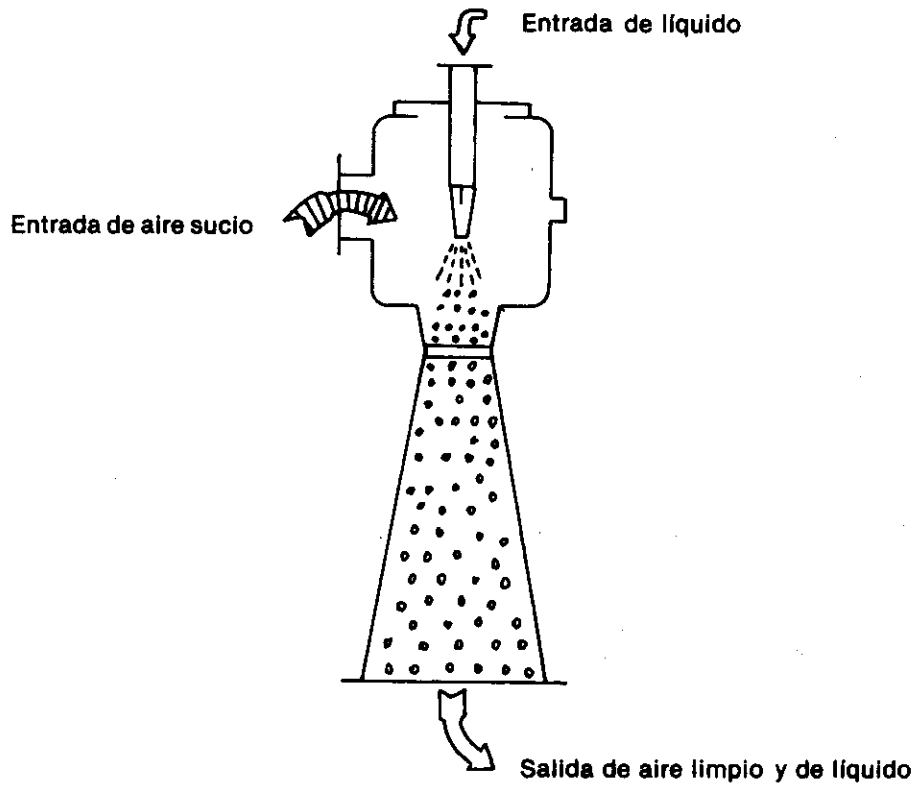


Figura 9.6

Lavador eyector



La selección del líquido es muy importante para conseguir alta eficiencia. Entre los factores que deben considerarse se encuentran:

- alta solubilidad del gas contaminante en el líquido.
- baja volatilidad del líquido.
- baja corrosividad
- baja viscosidad
- baja toxicidad
- baja inflamabilidad
- alta estabilidad química
- bajo costo y disponibilidad en el comercio.

La absorción y el lavado son aplicables en las siguientes situaciones:

- cuando el contaminante, gas o vapor, es soluble en el líquido (las partículas no necesitan ser solubles).
- cuando el afluente de gas lleva contaminantes gaseosos o particulados.
- cuando los gases son combustibles.

Adsorción. Se realiza con equipos en los cuales los gases o vapores contaminantes son retenidos sobre la superficie de un medio poroso, a través del cual fluye el gas. Los medios más usados son: carbón activado, sílica gel y alúmina activada.

Los equipos consisten en recipientes metálicos, en cuyo interior se dispone de un lecho de carbón activado de 1 a 9 m de profundidad, a través del cual las emisiones contaminantes que se adsorben pasan a una velocidad de 10 m/s. Previo al paso por el lecho de adsorción, el fluido debe acondicionarse para evitar la presencia de partículas en suspensión, el exceso de humedad (humedad relativa inferior a 50%) y temperaturas excesivas (inferiores a 50°C).

El material adsorbente saturado puede remplazarse por material nuevo, o recuperarse por medio de calor o vapor.

La adsorción puede utilizarse para emisiones provenientes de:

- limpieza en seco
- desengrase con solventes orgánicos
- pintura
- extracción de solventes
- tratamientos de superficies metálicas
- impregnación de papel y tejidos con resinas
- fabricación de tintas y barnices
- industria de alimentos

Se emplea básicamente para prevenir el escape al ambiente de vapores olorosos y orgánicos nocivos. Ocasionalmente puede utilizarse para remover bajas concentraciones de materiales gaseosos de elevada toxicidad, como en el caso de vapores de iodo radiactivo; y es un método eficiente para el control de gases o vapores, en concentraciones inferiores a 500 ppm.

En general, la eficiencia de un sistema de adsorción sólido-gas depende de varios factores, entre los cuales se incluyen: área superficial del adsorbente; afinidad del adsorbente con el contaminante; temperatura; presión, tiempo de retención; densidad y presión del contaminante; concentración del contaminante; y conformación geométrica del lecho o carga de relleno.

El carbón activado se ha utilizado como adsorbente en:

- la industria procesadora de alimentos: manipulación y mezcla de especias, enlatados, cocción, fermentación.
- la manufactura y uso de compuestos químicos: plaguicidas, gomas, fertilizantes, productos farmacéuticos, producción de pintura y barniz; y en la liberación de vapores olorosos emitidos a la atmósfera durante las operaciones de llenado de tanques.

El carbón activado constituye uno de los adsorbentes de mayor uso, por su bajo costo y por su facilidad de regeneración.

CONTROL DE PARTICULAS

Separación por gravedad: Utiliza el principio de la sedimentación de las partículas que transporta una corriente de gas, por acción de la gravedad. La eficiencia de estos equipos depende de la velocidad (baja o alta) de la corriente gaseosa, que permita la sedimentación; o de la aplicación de una fuerza centrífuga que incremente la masa de las partículas. La eficiencia de colección varía, también, con el tamaño de las partículas y el tipo de colector.

Entre los equipos colectores que aprovechan este principio se cuentan las cámaras de sedimentación, los ciclones y los multicyclones.

Cámara de sedimentación. Emplea la fuerza de la gravedad para separar el polvo de la corriente gaseosa, reduciendo su velocidad.

Utilización, ventajas y desventajas

Las cámaras de sedimentación se usan como elementos previos de limpieza en equipos de control de partículas más eficientes, especialmente en refinación de metales, industrias alimenticias y calderas alimentadas con carbón. Dentro de sus ventajas se encuentran: simplicidad de diseño, construcción e instalación; desgaste reducido, y bajo costo de operación. Entre sus desventajas se incluyen: baja eficiencia si se trata de partículas pequeñas; y necesidad de grandes espacios.

Por razones de orden práctico, las cámaras de sedimentación no son empleadas para la remoción de partículas inferiores a 50×10^{-6} m de diámetro. Para prevenir el arrastre de partículas separadas, la velocidad de la corriente gaseosa que entra en la cámara de sedimentación no debe exceder de 3 m/s. Su eficiencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{100 \times U_t \times WL}{Q}$$

donde:

E = eficiencia, porcentaje en peso de las partículas con velocidad de sedimentación U_t (sin dimensión)

U_t = velocidad de sedimentación en polvo m/s.

, L = longitud de la cámara, m.

W = ancho de la cámara, m.

Q = caudal de la corriente gaseosa, m³/s.

El tamaño mínimo de una partícula que puede separarse de la corriente gaseosa se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$dp = \left(\frac{18 \mu HV}{g L (\rho_p - \rho_g)} \right)^{1/2}$$

donde:

dp = tamaño mínimo de la partícula recolectada, m.

μ = viscosidad del gas, g/ms

H = altura de la cámara, m.

V = velocidad del gas, m/s.

L = longitud de la cámara, m.

g = constante gravitacional, m/s².

ρ_p = densidad de la partícula, g/m³.

ρ_g = densidad del gas, g/m³

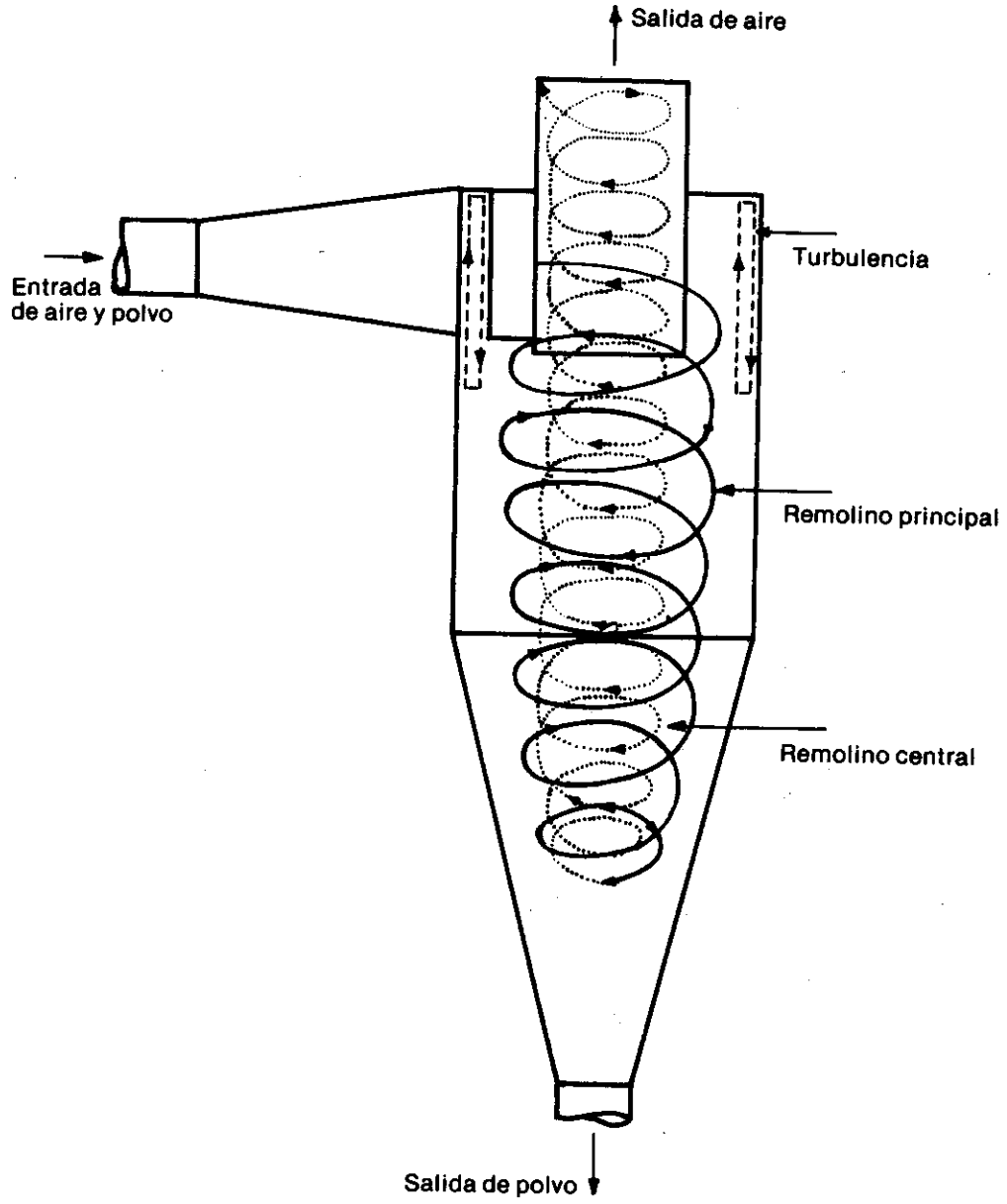
Ciclones colectores centrifugos. En estos equipos se emplea la fuerza centrífuga para separar el polvo de la corriente gaseosa. Puede utilizarse por limpieza previa o como colectores finales. En condiciones comunes de operación de ciclones de baja resistencia y diámetro muy grande la fuerza centrífuga de separación o aceleración puede aumentar hasta cinco veces la gravedad; y hasta 2 500 veces en unidades de alta resistencia y de diámetro muy pequeño (figura 9.7).

Los elementos básicos del ciclón son: una entrada de aire que produce el torbellino (generalmente rectangular); una salida axial para el aire limpio; y una abertura para la descarga del polvo. Entre los varios tipos de ciclones, están los de:

- entrada tangencial y descarga de polvo axial (el más común)
- entrada tangencial con descarga periférica de polvo.
- entrada axial a través de paletas, torbellino y descarga.
- polvo axial.

Figura 9.7

Ciclón. Mecanismo de operación



— entrada axial a través de paletas-torbellino, con descarga periférica de polvo.

El factor primario que debe tomarse en cuenta para controlar la eficiencia de colección en el diseño de un ciclón, es su diámetro; una unidad de diámetro pequeño, que opera con una caída de presión fija, tendrá la mayor eficiencia. No obstante, los ciclones de diámetro pequeño requieren de una serie de unidades en paralelo para una capacidad determinada. Las relaciones a considerar en el diseño de un ciclón, son:

Longitud del cuerpo y del diámetro: incrementando la longitud del cuerpo del ciclón, se aumenta el tiempo que permanecen las partículas sujetas a la fuerza de separación del remolino. Entre más largo sea el cuerpo del ciclón, mayor oportunidad para separar el polvo del remolino central, antes que salga con el gas. La altura para la zona del remolino principal deberá ser, como mínimo, de cinco y media veces el diámetro del ducto de salida (preferiblemente de ocho o doce veces). Al incrementar la relación entre el diámetro del cuerpo y el del ducto de salida de gas, hacia una proporción cercana a 3. —la relación óptima se encuentra entre 2 y 3— se aumentan la eficiencia y la caída de presión.

Ducto de descarga de polvo: la principal causa del trabajo deficiente de un ciclón, es el escape de aire por el lado de la salida del polvo. Si se conecta una tolva o depósito cerrado al cono, por un tubería corta, el remolino del ciclón existirá en algún grado dentro del depósito, produciéndose un flujo ascendente cargado de polvo. Es posible eliminar esto, si se colocan aletas o pantallas en el ciclón, cerca del orificio de la descarga de polvo. Si el depósito inferior no está herméticamente cerrado y el ciclón se encuentra bajo presión negativa, el aire es absorbido en la tubería de descarga, con gran demérito de la eficiencia.

Ducto de entrada del gas: el ducto más próximo a la entrada tangencial del ciclón es usualmente redondo y la transición a la entrada rectangular debe ser gradual, con un ángulo máximo de 15° , para evitar una caída de presión excesiva debida al chorro de gas que entra al ciclón.

La dirección del ducto de entrada influye en la eficiencia de colección. En efecto, se obtiene la mayor eficiencia con una entrada tangencial al cuerpo del ciclón. Por otra parte, los codos en la tubería de entrada pueden aumentar o limitar la separación del polvo.

Ducto de salida del gas: Deberá tener una extensión determinada dentro del cuerpo del ciclón, de manera que no se permita la salida de cantidades excesivas de polvo. La longitud óptima es de 1.25 veces el diámetro de la tubería de salida.

El principal parámetro para apreciar la eficiencia de colección de un ciclón es el tamaño de la partícula, utilizándose la siguiente ecuación para determinar el diámetro mínimo de la que se separa completamente de la corriente gaseosa:

$$D_p \text{ mínimo} = \sqrt{\frac{9\mu Bc}{\pi N_{tc} V_c (\rho_s - \rho)}}$$

donde:

D_p = diámetro mínimo de partícula recolectada, m.

μ = viscosidad del fluido, g/m/s.

Bc = ancho del ducto de entrada al ciclón, m.

V_c = velocidad promedio de entrada del gas, m/s.

N_{tc} = número de vueltas efectuadas por la corriente gaseosa dentro del ciclón.

ρ_s = densidad de la partícula g/m³.

ρ = densidad de fluido, g/m³

π = constante 3.1416.

Con esta ecuación y de acuerdo con la gráfica de la figura 9.8, se determina la eficiencia de colección de un ciclón. Esta figura proporciona la eficiencia de colección para una relación de tamaño de corte (D_{pc}), donde el D_{pc} (tamaño de partícula correspondiente a una eficiencia fraccional de 50%) es definido por:

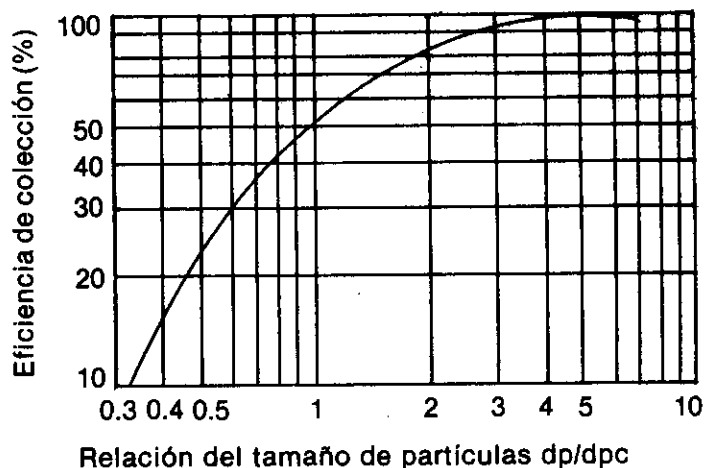
$$D_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu Bc}{2\pi N_{tc} V_c (\rho_s - \rho)}}$$

D_{pc} = (tamaño de partícula correspondiente a una eficiencia fraccional de 50%)

Utilización: los ciclones se han empleado para remover sólidos y líquidos de gases, así como sólidos de líquidos, operándose a temperaturas hasta de 1000°C y presiones hasta de 50 600 ka. Los ciclones para remover sólidos de gases se utilizan generalmente para partículas mayores de 5×10^{-6} m de diámetro; sin embargo, las unidades paralelas de tubo múltiple alcanzan eficiencias de 80 a 85% para partículas de 3×10^{-6} m de diámetro.

Figura 9.8

Eficiencia de colección del ciclón



Fuente: *Industrial Hygiene Toxicology*. Vol. 1. General principles, Frank A. Patty. 1978.

Para la colección de partículas de diámetros superiores a 200×10^{-6} m, pueden emplearse los ciclones; sin embargo, las cámaras de sedimentación por gravedad son generalmente satisfactorias. Cuando el polvo presenta un alto grado de aglomeración o se encuentra en concentraciones altas, mayores de 3.5 g/m^3 , los ciclones separan un tamaño menor de partícula alcanzándose eficiencias de 93% para las de 0.1 a 2×10^{-6} m.

Ventajas y desventajas

Entre las ventajas del ciclón se incluyen: bajo costo; menor consumo de energías; y simplicidad de diseño, mantenimiento y construcción. Presenta una caída de presión mayor que la cámara de sedimentación, con costos de operación más altos pero inferiores a otros equipos limpiadores.

Entre las desventajas se citan: eficiencia baja para partículas inferiores a 5×10^{-6} ; abrasión excesiva; y taponamiento por la presencia de altas concentraciones de polvo, de materiales higroscópicos y adhesivos.

— Multiciclones: constan de varios ciclones de pequeño diámetro, instalados comúnmente en paralelo (y a 30 centímetros). Son equipos de mayor cos-

to inicial que los ciclones ordinarios y se utilizan generalmente como método de control final, pero también sirven para realizar una limpieza previa (prelimpiadores).

FILTRACION

La filtración se emplea para remover material particulado de una corriente gaseosa; su eficiencia para partículas pequeñas es alta, aun para diámetros inferiores a 0.05×10^{-6} m.

Los costos de inversión inicial y de mantenimiento oscilan, de acuerdo con la densidad de las partículas y con la cantidad y temperatura de la corriente gaseosa que contiene el polvo.

Entre los factores que limitan el empleo de la filtración se encuentran las características de la corriente gaseosa (temperatura elevada), la carga de polvo que contiene y la ruptura del filtro.

Estos medios pueden estar constituidos por capas filtrantes, lechos de agregados (arena o fibra de vidrio), así como filtros de papel de tela.

Capas filtrantes y lechos de agregados: son materiales de alta porosidad. Cuando la concentración de polvo es baja, puede lograrse alta eficiencia. Para partículas con tamaño menor a 1 mm y empleando arena como medio filtrante, se alcanzan eficiencias de colección de 99.7%; pero con capas de fibra de vidrio y para cargas de polvo de 0.02 a 0.04 mg por pie cúbico, se logra elevarlas aún más.

Ventajas: los filtros de lechos de agregados no requieren limpieza frecuente; tienen alta capacidad de almacenamiento de polvo y un incremento pequeño en la resistencia al flujo de aire; pueden utilizarse para emisiones con elevadas temperaturas; son de alta eficiencia y, asimismo, resistentes a la corrosión.

Desventajas: dificultad para su limpieza; grandes necesidades de espacio; posibilidad de taponamiento por contaminantes húmedos y adhesivos; costo elevado; y baja resistencia a temperaturas elevadas.

Filtros de papel: tienen aplicación en la limpieza de aire, especialmente en hospitales, centros de procesamiento de datos, plantas procesadoras de alimentos e instalaciones de energía atómica. Pueden construirse de asbesto y fibras de vidrio y generalmente se emplean como filtro final para remover partículas muy pequeñas en concentraciones bajas.

La estructura puede ser de acero, aluminio o madera, según su aplicación. Dicha estructura se fija con empaquetaduras en ambos lados, para asegurar un buen sellado. Estos sistemas de filtro requieren una inversión inicial moderada y costos de operación bajos.

Ventajas: no necesitan limpieza.

Desventajas: no son reutilizables y se emplean para cargas de polvo y caudales de flujo bajos.

Filtros de tela: es uno de los métodos más eficientes para remover partículas de corriente gaseosas; alta eficiencia de recolección para partículas del orden de 0.01×10^{-6} m. Comercialmente se presentan en dos diseños: bolsas tubulares y bolsas planas. En las tubulares, las partículas se recogen tanto en la superficie exterior como en la interna; en las planas, se recolectan en la superficie externa. La recolección ocurre por la intercepción e impacto de las partículas sobre los filtros de tela y por difusión, atracción y sedimentación dentro de los poros. Las bolsas tienen una duración promedio de 18 a 36 meses (figuras 9.9 y 9.10).

Estos colectores son de gran tamaño, debido a que las velocidades de operación a través de los filtros de tela son bajas (0.47 a 2.4 l/s). Presentan una resistencia alta entre las 0.5 y 3.7 ka. Para evitar daños al filtro por humedad, los equipos deben mantenerse encima del punto de rocío de la corriente gaseosa. Los filtros de tela se utilizan para polvo seco, no adhesivo ni aceitoso. Tienen una eficiencia de colección del orden de 99 por ciento.

Factores que deben considerarse para la aplicación de los filtros de tela:

— Relación volumen de aire-superficie del filtro.

$$\frac{A}{C} = \frac{Q}{A}$$

donde:

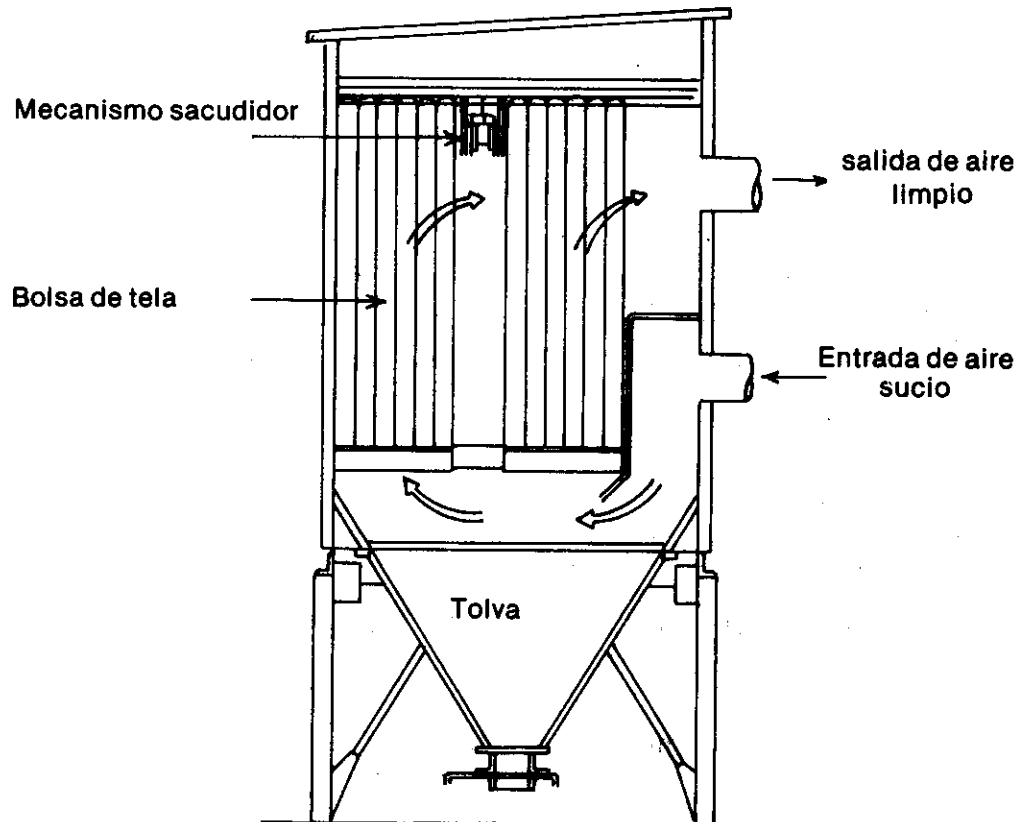
$$\frac{A}{C} = \text{relación volumen de aire-superficie del filtro, m/min.}$$

Q = caudal volumétrico de gas, m³/min.

A = área neta de tela, m²

— Material del filtro: la permeabilidad se expresa como volumen de aire (m³/min) que pasa a través de un metro cuadrado de tela limpia. El rango usual de permeabilidad es de 0.283 a 0.849 m³ por minuto, por 0.09 m² de tela

Figura 9.9
Filtro de tela



— Limpieza o arrastre por filtro:

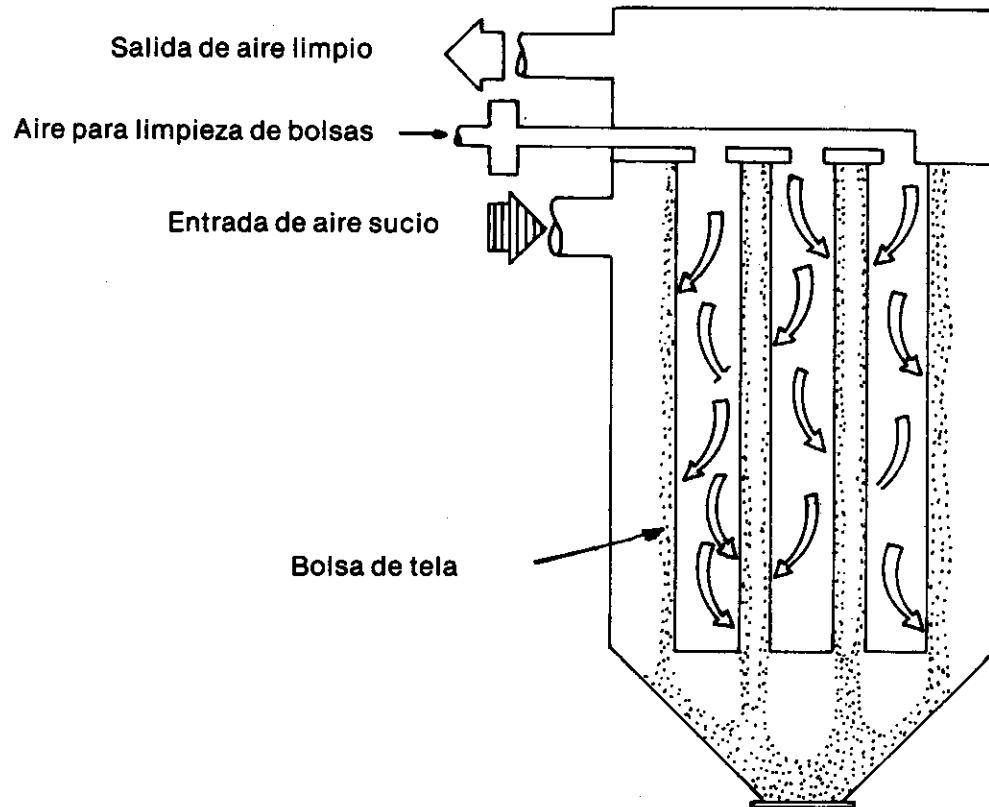
$$S = \frac{PA}{Q}$$

donde:

- S = limpieza por filtro ($\text{mm H}_2\text{O}/\text{m}^2\cdot\text{min}$)
- P = caída de presión a través del filtro
- A = área neta del filtro (m^2)
- Q = Caudal volumétrico de gas (m^3/min).

Figura 9.10

Filtro de tela con flujo de aire inverso



La separación del polvo retenido, del medio filtrante, puede realizarse por:

- sacudida mecánica (sacudida de las bolsas)
- flujo inverso (circulación de aire limpio en sentido opuesto al normal de la corriente gaseosa cargada de polvo).
- ondas sonoras (producción de sonidos de baja frecuencia-vibración).

El cuadro 9.1 enumera las principales características de los filtros de tela.

Tabla No. 9.1

Características de los Filtros de Tela

NOMBRE DE LA TELA	TEMPERATURA MAXIMA, °C		RESISTENCIA A LA ACCION FISICA				RESISTENCIA A LOS QUIMICOS				
	Op. continua	Op. intermitente	Calor seco	Calor húmedo	Abrasión	Sacudida	Acido mineral	Acido orgánico	Alcalis	Oxidante	Solvente
Algodón	82	—	B	B	R	B	P	B	R	R	E
Poliéster	135	—	B	R	B	E	B	B	R	B	E
Acrílico	135	140	B	B	B	B	B	B	R	B	E
Nylon (Dupont)	204	232	E	E	E	E	P-R	E	B	B	E
Nylon (enka)	107	232	B	B	E	E	P	R	B	R	E
Polipropileno	93	—	B	R	E	E	E	E	E	B	B
Teflón	232	—	E	E	P-R	B	E	E	E	E	E
Vidrio	260	315	E	E	P	P	E	E	R	E	E
Lana	101	120	R	R	B	R	R	R	P	P	R

E = Excelente B = Buena R = Regular P = Pobre
 Fuente = *Industrial Ventilation*, 17a. edición.

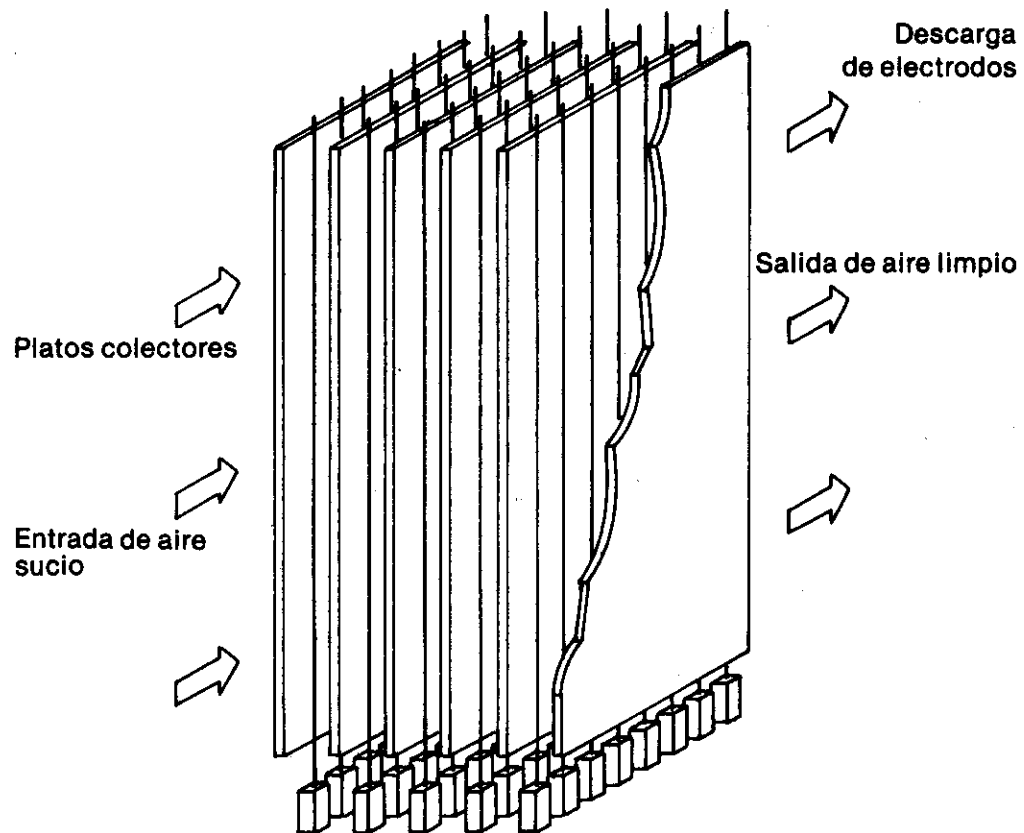
PRECIPITACION ELECTROSTATICA

Consiste en la separación de las partículas contenidas en una corriente gaseosa, mediante el empleo de placas o electrodos cargados eléctricamente; para ionizar las referidas partículas que se recolectan en superficies con carga opuesta. Son equipos útiles en aquellos casos en que el tamaño de las partículas es muy pequeño y se necesitan eficiencias altas de recolección (figura 9.11).

El tamaño del precipitador depende de la resistencia específica del polvo, del caudal volumétrico del gas procesado y de la carga estimada de polvo.

Figura 9.11

Precipitador electrostático tipo placas



La eficiencia de recolección de un precipitador electrostático puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$E = 100 \left(1 - e^{-\frac{AW}{Q}} \right)$$

donde:

E = eficiencia de recolección, porcentaje.

A = área de los electrodos de recolección, m²

Q = caudal de gas, m³/min.

W = velocidad de migración de las partículas, m/min.

La velocidad de migración es un factor empírico, que generalmente varía de 2 a 14 cm/seg.

La eficiencia de recolección se encuentra en función del área del electrodo, del caudal del flujo de gas, de la uniformidad del mismo y de la resistencia eléctrica del aerosol.

Una placa del precipitador electrostático proporciona una eficiencia de recolección de 70 a 90%. Mediante el empleo de placas sucesivas, la eficiencia del precipitador se incrementa a valores superiores. Es así como se logra la eficiencia de recolección, para un precipitador de seis placas, del orden de 99 por ciento.

Los precipitadores electrostáticos se han utilizado con frecuencia en plantas termoeléctricas, fábricas de cemento, fundiciones de metales no ferrosos, industrias de celulosa e incineradores de desechos sólidos.

Ventajas

- Alta eficiencia de recolección, en ocasiones superior a 99%.
- Recolección de partículas de tamaño muy pequeño. Teóricamente no hay un límite inferior en cuanto al tamaño de la partícula que puede remover.
- Diseño para operar en forma continua con poco mantenimiento, durante periodos prolongados.
- Empleo con altas temperaturas, del orden de los 370 a los 540°C.
- Utilizables para recolectar neblinas ácidas y de alquitrán, difíciles de remover por otros métodos.

- Construidos en forma especial, pueden manejar materiales altamente corrosivos.
- Pueden tratar grandes volúmenes de gas.
- La pérdida de presión es pequeña.
- Los costos de operación y de mantenimiento son bajos. (0.2 a 0.6 HP/28.3 m³/min).

Deventajas

- Alto costo inicial
- Requieren grandes espacios, a veces mayores que los filtros.
- Pueden requerir el empleo de un limpiador previo, generalmente del tipo ciclón, para reducir la carga de polvo que llega al precipitador.
- Útiles solamente para material “particulado”.
- La alta tensión puede representar un riesgo.

COLECTORES HUMEDOS

Son equipos que utilizan agua u otro líquido, para remover de la corriente gaseosa un contaminante (cuadro 9.2). Los lavadores son los únicos equipos que pueden emplearse para todo tipo de contaminantes: gases, líquidos y sólidos solubles o insolubles. Entre estos equipos están: torres de rociado, torres de relleno, ciclón húmedo y lavador venturi (figuras 9.3, 9.4 y 9.5).

El tipo de lavador que se utilice depende de las características del contaminante y del grado de control requerido.

La eficiencia de los equipos lavadores o húmedos se relaciona con la caída de presión. Entre mayor sea el contacto entre el líquido y el aerosol, la caída de presión y la eficiencia de colección serán más altas.

Ventajas

Pueden recolectar partículas y gases al mismo tiempo; disuelven las partículas solubles; tienen el doble uso de enfriadores y equipo de control de la contaminación; evitan los riesgos de explosión por la presencia de polvos

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

Desventajas

Se produce cristalización de las sustancias solubles; requieren un lecho de sedimentación para las partículas insolubles; presentan dificultades para la remoción de los lodos; pueden generarse problemas de taponamiento en boquillas y contaminación de aguas; requieren equipo auxiliar, como bombas y tanques; presentan alta acción corrosiva; las partículas menores de 1 mm son recolectadas con baja eficiencia, hay gran evaporación del líquido, cuando el contaminante a remover se encuentra caliente; excesivo consumo de energía; posibilidad de congelamiento del líquido, en zonas frías; con flujos bajos de aire, el contacto aerosol líquidos es pobre; con flujos altos de aire, el tiempo de contacto puede reducirse.

Torres de rociado:

La corriente de aire a baja velocidad se rocía o humedece con agua, a través de boquillas. Las partículas, al ser humedecidas, forman otras más densas, que caen por gravedad. Presentan alta eficiencia de recolección para partículas superiores a 10×10^{-6} m.

Generalmente, la corriente gaseosa ingresa por la parte inferior de las torres, y las boquillas ubicadas en la parte superior inyectan líquido a una velocidad determinada. El tiempo de permanencia y la velocidad promedio entre la corriente gaseosa que se transporta hacia arriba (inferior a 3 m/s) y las gotas de líquido que viajan hacia abajo, determinan la cantidad de contaminante que se recolecta. La eficiencia de recolección de las partículas aumenta al decrecer el tamaño de las gotas del líquido. El tamaño óptimo de gota es de 500 a 1000×10^{-6} m.

Las torres de rociado son útiles como preenfriadores.

En caso de que el líquido sea reutilizado, las boquillas corren peligro de taponamientos, por la presencia de partículas insolubles.

Torres de relleno:

En estos equipos, la corriente gaseosa pasa a través de una capa de material de recolección, granular o fibroso, constituido por anillos de cerámica, coque o material similar, dejándose caer el líquido a través del relleno. El flujo del agua es de 0.53 a 1.1 l/min por m³/min de aire. La altura del relleno es generalmente de 1.2 m. La caída de presión, de 0.4 a 0.9 ka. Las torres con relleno se utilizan para humos metálicos y polvo fino.

Ciclón húmedo:

Es un ciclón común, con una entrada de agua u otro líquido que se hace chocar con las partículas que ingresan. Su costo de operación es mayor, comparado con el ciclón en seco. Se incrementa la eficiencia de colección al aumentarse la densidad de las partículas.

El ciclón húmedo presenta pocos problemas de erosión, pero puede ocurrir una situación grave en caso de que el polvo sea corrosivo. Es necesario efectuar una limpieza y la disposición adecuada del líquido o agua contaminada.

Cuadro 9.2

Equipos para limpieza de aire utilizados en la industria

INDUSTRIA Y OPERACION	CONCENTRACION (1)	TAMAÑO DE PARTICULA (2)	CICLON	COLECTOR HUMEDO	FILTRO DE TELA	PRECIPITADOR ELECTROSTATICO	
						VOLTAJE ALTO	VOLTAJE BAJO
Cerámica: Manejo de materia prima Encolado refractario Barnizado	Ligera	Fino	A	A	A	N	N
	Pesada	Grueso	N	R	A	N	N
	Moderada	Medio	N	A	A	N	N
Químicos: Manejo de materiales Triturado y molienda Transporte neumático	Ligera a moderada	Fino a medio	A	A	A	N	N
	Moderada a pesada	Fino a grueso	A	A	A	N	N
	Muy pesada	Fino a grueso	A	R	A	N	N
Calcinadores, hornos, enfriadores	Pesada	Medio a grueso	A	A	A	N	A
Minería de carbón y plantas, de energía: Manejo de material Ventilación carbonera Secado	Moderada	Medio	A	A	A	N	N
	Moderada	Fino	R	R	A	N	N
	Moderada	Fino	N	A	R	N	N
Ceniza fina: Quema de carbón pulverizado Quema de madera	Pesada	Fino	R	R	A	A	N
	Moderada	Fino a grueso	R	R	A	R	N
Fundición: Manejo de arena	Moderada	Fino a medio	N	A	A	N	N
Molinos	Pesada	Medio a grueso	N	A	A	N	N
Limpieza abrasiva	Moderada a pesada	Fino a medio	N	A	A	N	N

(Continúa)

(Continuación)

INDUSTRIA Y OPERACION	CONCENTRACION (1)	TAMAÑO DE PARTICULA (2)	CICLON	COLECTOR HUMEDO	FILTRO DE TELA	PRECIPITADOR ELECTROSTATICO	
						VOLTAJE ALTO	VOLTAJE BAJO
Transporte de granos, molinos de harina y pienso:							
Manejo de granos	Ligera	Medio	A	R	A	N	N
Secado de granos	Ligera	Grueso	R	R	A	N	N
Polvo de harina	Moderada	Medio	A	R	A	N	N
Molienda de pienso	Moderada	Medio	A	R	A	N	N
Fundición de metal:							
Horno de fundición de acero	Pesada	Varía	N	A	R	R	N
Horno de acero de hogar abierto	Moderada	Fino a grueso	N	A	R	R	N
Horno eléctrico	Ligera	Fino	N	R	A	R	N
Horno cúpula ferrosa	Moderada	Varía	N	A	A	N	—
Minería metálica y productos de roca:							
Manejo de material	Moderada	Fino a medio	N	A	A	N	N
Secadores, hornos	Moderada	Medio a grueso	N	A	A	A	N
Secado de cemento	Moderada	Fino a medio	N	R	R	R	N
Horno de cemento	Pesada	Fino a medio	—	—	—	—	—
Molienda de cemento	Moderada	Fino	N	N	A	N	N
Enfriado de clinker de cemento	Moderada	Grueso	N	N	A	N	N
Trabajo en metal:							
Pulido, cepillado, corte	Ligera	Grueso	A	R	A	N	N
Brillo	Ligero	Varía	R	R	A	N	N
Taller	Ligera	Fino	R	A	R	N	N
Fresado de hierro	Moderada	Varía	A	A	A	N	R

(Continúa)

(Continuación)

INDUSTRIA Y OPERACION	CONCENTRACION (1)	TAMAÑO DE PARTICULA (2)	CICLON	COLECTOR HUMEDO	FILTRO DE TELA	PRECIPITADOR ELECTROSTATICO	
						VOLTAJE ALTO	VOLTAJE BAJO
Productos farmacéuticos y alimenticios: Mezcladores, molinos, pesaje ensacadora, empaque	Ligera	Medio	A	A	A	N	N
Plásticos: Procesamiento de material prima Acabado de plásticos	Ver químicas Ligera a moderada	Ver químicas Varia	A R	R R	A A	N N	N N
Productos de caucho: Mezcladores Adición de talco y retiro Melienda	Moderada Moderada Moderada	Fino Medio Grueso	R R A	A R A	A A A	N N N	N N N
Trabajo en madera: Máquinas de trabajo en madera Lijado Transporte de desechos	Moderada Moderada Pesada	Varia Fino Varia	A A A	R R R	A A A	N N N	N N N

(1) Ligera = menos de 2 g/28.32 cm³

Moderada = 2 a 5 g/28.32 cm³

Pesada = > 5 g. 28.32 cm³

(2) Fino: 50% < de 5 × 10⁻⁶ m

Medio: 50% de 5 a 15 × 10⁻⁶ m

Grueso: 50% de 15 × 10⁻⁶ m y más

A: A menudo

R: Rara vez

N: Nunca

Fuente; *Industrial ventilation*. 17a. edición.