



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXCO

24
2ej.

Facultad de Ingeniería

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONTROL
DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS GENERADOS POR FUENTES FIJAS

263588



ESTALA ALVAREZ LUIS ISRAEL
1998

TESIS
PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL

DIRECTOR DE TESIS
ING. MIGUEL ANGEL GONZALEZ LOPEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-119/97

Señor
LUIS ISRAEL ESTALA ALVAREZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. MIGUEL ANGEL GONZALEZ LOPEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE DISPOSITIVOS DE CONTROL DE CONTAMINANTES
ATMOSFERICOS GENERADOS POR FUENTES FIJAS"**

- INTRODUCCION**
- I. LEGISLACION AMBIENTAL RELATIVA A LA PREVENCION Y CONTROL DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS GENERADOS POR FUENTES FIJAS**
 - II. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LOS PRINCIPALES DISPOSITIVOS DE CONTROL DE PARTICULAS**
 - III. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LOS PRINCIPALES DISPOSITIVOS DE CONTROL DE GASES**
 - IV. CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 23 de septiembre de 1997.
EL DIRECTOR.


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*lmf

José Luis Estala Estevez
Evangelina Alvarez Gómez

Padres, gracias por brindarme la oportunidad de alcanzar un gran sueño, el sueño de ser ingeniero.

Papá, con tus sabios consejos, con tu gran experiencia, con tu honradez, lograste plasmar en mi una base para crecer y seguir adelante. Nunca olvidaré tu compañía y el gran apoyo que recibo de ti.

Me siento orgulloso de decir abiertamente que soy afortunado al tener un padre como tú pues también tu gran corazón y paciencia me recordaron durante toda la carrera que ayudar al prójimo desinteresadamente es parte fundamental del ingeniero y por lo tanto de mí.

Papá, no todo lo aprendí en la escuela, sino también a tu lado, por lo que me da orgullo decir "**José Luis Estala Estevez**" **que gran ingeniero eres !!!**.

Mamá, con tu amor, ternura y comprensión me diste las armas necesarias para afrontar todos mis problemas, pues gracias a ti siempre pongo el corazón por delante, gracias por cuidar todos los detalles que me permitieron seguir adelante, gracias por tener siempre la paciencia y palabras de aliento que sólo una mamá como tu puede dar.

Padres, esta tesis y más se los debo a ustedes, pero mi labor no termina aquí, pues mi camino es todavía bastante largo y sin su ayuda no lo podré seguir, por lo que estoy seguro que nunca me dejarán caer (los quiero y que bendición la mía tenerlos junta así cada día).

Rocio– gracias por tu apoyo durante todo este tiempo, plasmaste en mi tu carácter de abogada y por lo tanto tu forma de ser siempre positiva y reventada. (siempre tendrás mi apoyo)

Paco – gracias por enseñarme el lado difícil de la vida, gracias por hacerme fuerte de carácter, gracias por tus enseñanzas, gracias por ayudarme a sobrevivir en la calle. (siempre tendrás mi apoyo)

Norma – una linda pollita (basurera) en la que tengo mi corazón, tu infinito amor me permitió seguir adelante, gracias por tu linda sonrisa, por tus lindos ojos, por brindarme tu amor y ternura. Tu sencillez y esperanza me han dado una luz en un mundo oscuro. (seguiremos juntos de la mano afrontando todos los problemas que como linda pareja tenemos).

Miguel- gracias por dirigir mi vida profesional, desde que recibí tu apoyo incondicional las cosas me funcionaron mejor, eres un gran profesor y amigo, pues tu labor no solo culminó en las aulas sino que también sabes ayudar fuera de ellas.

Si me preguntaran quien es el mejor profesor que he conocido, yo diría con la frente en alto : **Miguel Angel González López.**, la persona que enfocó todos mis esfuerzos hacia maestría y próximamente hacia el doctorado. (siempre seré tu alumno)

A todos los Estala Gracias, por su gran calor humano que como familia tenemos.

A todos los amigos gracias, en especial a **Francisco** (inseparable amigo durante toda la carrera, tu carácter sencillo y tus ganas de seguir adelante son únicos) y **Carlos** (chococate, eres el mejor) que con amistad y apoyo seguimos adelante.(gracias hermanos)

Jaime Martinez Martinez gracias por descubrir en mí la vocación de profesor, tu ayuda me a guiado a transmitir mis conocimientos desinteresadamente.

Me es difícil despedir esta dedicatoria pues son innumerables los grandes momentos que viví durante mi carrera. Por lo que mejor la terminaré en maestría.....

¡ nos vemos en maestría y próximamente en el doctorado!

INDICE

I	Introducción.	
I.1	Generalidades de la contaminación atmosférica.	
I.1.1	Definiciones	4
I.1.2	Aspectos de meteorología.	6
I.1.3	Clasificación de los contaminantes atmosféricos y sus efectos en el ambiente.	12
I.2	Generalidades del control de contaminantes atmosféricos generados por fuentes fijas.	
I.2.1	Procesos de medición y métodos de monitoreo de emisiones contaminantes.	21
I.2.2	Clasificación de los dispositivos de control.	29
I	Legislación ambiental relativa a la prevención y control de contaminantes atmosféricos generados por fuentes fijas.	
I.1	Problemática de la contaminación atmosférica.	I.1
I.2	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.	I.3
I.3	Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera.	I.6
I.4	Normatividad relativa a la prevención y control de emisiones de contaminantes generados por fuentes fijas.	I.7
II	Diseño y construcción de los principales dispositivos de control de partículas	
II.1	Clasificación de los dispositivos de partículas.	II.1
II.2	Principales parámetros para el diseño de dispositivos de control de partículas.	II.3
II.3	Ciclones	
II.3.1	Aspectos generales	II.9
II.3.2	Diseño	II.13
II.3.3	Especificaciones y construcción	II.17
II.3.4	Fabricantes	II.20
II.3.5	Ejemplo del diseño de un ciclón	II.21

II.4	Filtros de bolsa	
II.4.1	Aspectos generales	II.28
II.4.2	Diseño	II.32
II.4.3	Especificaciones y construcción	II.37
II.4.4	Fabricantes	II.43
II.4.5	Ejemplo del diseño de un filtro de bolsa	II.44
II.5	Colectores húmedos	
II.5.1	Aspectos generales	II.47
II.5.2	Diseño	II.56
II.5.3	Especificaciones y construcción	II.59
II.5.4	Fabricantes	II.61
II.5.5	Ejemplo del diseño de un colector húmedo	II.62
II.6	Precipitador electrostático	
II.6.1	Aspectos Generales	II.64
II.6.2	Diseño	II.66
II.6.3	Especificaciones y construcción	II.72
II.6.4	Fabricantes	II.75
II.6.5	Ejemplo del diseño de un precipitador electrostático	II.76
 III Diseño y construcción de los principales dispositivos de control de gases		
III.1	Principales parámetros para el diseño de dispositivos de control de gases	III.1
III.2	Dispositivos de incineración y combustión.	
III.2.1	Aspectos generales	III.3
III.2.2	Diseño	III.10
III.2.3	Especificaciones y construcción	III.15
III.2.4	Fabricantes	III.19
III.2.5	Ejemplo del diseño de un dispositivo de incineración	III.20
III.3	Torres empacadas	
III.3.1	Aspectos generales	III.22
III.3.2	Diseño	III.26
III.3.3	Especificaciones y construcción	III.30
III.3.4	Fabricantes	III.31
III.3.5	Ejemplo del diseño de una torre empacada	III.32
IV	Conclusiones	IV.1

INTRODUCCIÓN

Las actividades socioeconómicas, fundamentalmente las industriales, implican por lo general emisiones de contaminantes a la atmósfera. De aquí, que uno de los temas que con mas frecuencia escuchamos es el de la contaminación atmosférica.

Cuando se habla de contaminación del aire, se refiere a la presencia en la atmósfera de una o más sustancias o materiales (solos o combinados), en cantidades tales y con tal duración que puedan afectar la vida humana. Según los informes de las Secretarías gubernamentales, la concentración porcentual de contaminantes en las grandes ciudades de la República Mexicana es : 68 % de Monóxido de Carbono, 13% de Hidrocarburos, 10% de Partículas Suspendidas Totales (PST), 10.4 % de Oxidos de Nitrógeno, y el 5% restante son otros contaminantes.

Debido a la gran variedad de contaminantes emitidos a la atmósfera, para su estudio y comprensión se les suele clasificar como Partículas y Gases, provenientes de Fuentes Fijas como las industrias o Fuentes Móviles como son los automóviles.

Las Partículas se producen generalmente por las industrias o por la erosión del suelo. Su origen y composición es muy diverso, ya que pueden resultar de procesos de combustión, de la transformaciones de otros contaminantes o de mecanismos naturales. Es importante mencionar que dentro de las partículas sólidas, las de mayor impacto sobre la salud son aquellas cuyo diámetro es menor a 10 micras, pues una vez que se respiran ya no salen del organismo. Los Gases son el producto de la combustión incompleta de hidrocarburos. La nocividad de los gases radica en el deterioro de la salud en general.

Actualmente existen en las ciudades más importantes de México alrededor de 30,000 industrias, que contribuyen con aproximadamente el 13% de la contaminación atmosférica, emitiendo diariamente 15,000 toneladas de contaminantes. Entre las industrias mas contaminantes encontramos aquellas que se dedican a la producción de papel, tuberías de plomo, cementos, siderúrgicas y productos químicos, que emiten principalmente Bióxido de Azufre, Monóxido de carbono y Partículas.

Actualmente las industrias (Fuentes Fijas) no cumplen con los requisitos de control de emisiones contaminantes establecidos por el gobierno, básicamente por cuatro aspectos:

- Los equipos de control de emisiones contaminantes (Gases o Partículas) representan una inversión inicial de capital muy grande para la mayoría de las industrias mexicanas.

- Los equipos de control de emisiones contaminantes no se fabrican en México, por lo que su adquisición, operación y mantenimiento se debe hacer por medio de fabricantes extranjeros.
- Actualmente no se cuenta con investigaciones claras y resumidas que estén encaminadas al diseño y construcción de dispositivos de control de contaminantes atmosféricos generados por fuentes fijas.
- No existe la suficiente información condensada que permita a los industriales Mexicanos establecer un punto de partida para el establecimiento y construcción de los diferentes equipos de control de contaminantes de manera económica.

El presente trabajo integrado por cuatro capítulos se refiere al diseño y construcción de diferentes dispositivos de control de contaminantes generados por fuentes fijas, para lo cual se abarcan temas relacionados con las características, origen y efectos de los principales contaminantes generados por fuentes fijas, así como también aspectos de diseño y construcción que permiten de manera práctica adecuar los diferentes dispositivos de control de contaminantes existentes en el mercado a las características particulares de cada industria Mexicana.

En la introducción se establecen los aspectos y definiciones necesarios para entender las características y efectos de los contaminantes atmosféricos, así como su clasificación y su comportamiento una vez emitidos a la atmósfera.

Un punto muy importante dentro de la introducción son los procesos de medición y métodos de monitoreo de los contaminantes atmosféricos que nos permiten establecer un punto de partida para el estudio de los contaminantes emitidos por alguna industria en particular.

El primer capítulo presenta la legislación ambiental relativa a la prevención y control de contaminantes atmosféricos generados por fuentes fijas, además se establece la importancia de tener un control legal sobre la emisión de contaminantes a la atmósfera así como también se establecen los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera y los procedimientos de medición de los diferentes contaminantes atmosféricos.

El segundo capítulo se refiere de manera particular al diseño y construcción de los principales dispositivos de control de partículas, para lo cual es necesario clasificar los diferentes dispositivos de control existentes. Una vez clasificados se dan a conocer los parámetros que permiten diseñar dichos dispositivos, los cuales dependen principalmente de las propiedades de las partículas y del equipo de remoción.

Para completar el capítulo tres, se mencionan las características, diseño, construcción y fabricantes de los principales dispositivos de control de partículas (Ciclones, Filtros de Bolsa, Colectores Húmedos y Precipitador Electrostático), así como un ejemplo donde se aplican las diferentes fórmulas de diseño establecidas en el capítulo, los aspectos constructivos que se deben tomar en cuenta en su fabricación y montaje.

El cuarto capítulo se refiere de manera particular al diseño y construcción de los principales dispositivos de control de gases, para lo cual es necesario clasificar los diferentes dispositivos de control existentes. Una vez clasificados se dan a conocer los parámetros que permiten diseñar dichos dispositivos, los cuales dependen principalmente de las propiedades del gas contaminante y equipo de remoción.

Para completar el capítulo cuatro, se mencionan las características, diseño, construcción y fabricantes de los principales dispositivos de control de gases (Dispositivos de Incineración y combustión y Torres Empacadas), así como una aplicación de las diferentes fórmulas de diseño establecidas en el capítulo, considerando los aspectos constructivos que se deben tomar en cuenta en su fabricación y montaje.

En el último capítulo se establecen las conclusiones del presente trabajo, planteando algunas recomendaciones en cuanto al diseño y construcción de los diferentes equipos de control de partículas.

I.1 GENERALIDADES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

I.1.1 Definiciones

ATMÓSFERA

La atmósfera es una mezcla de gases que rodea a la Tierra, es una capa relativamente delgada donde la mayor parte del aire (95%) se encuentra dentro de los primeros 20 km sobre el nivel del mar, por encima de los cuales su densidad se desvanece de forma gradual en el vacío del espacio. La mayor parte de las actividades del hombre se realizan dentro de los primeros 2 km de la atmósfera.

La atmósfera esta compuesta principalmente por cuatro gases: nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, anhídrido carbónico, así como pequeñas cantidades de helio, neón, kriptón, xenón, hidrógeno y óxido nitroso.

La atmósfera tiene una estructura bien determinada, clara y organizada, en la que se distinguen cinco capas:

La tropósfera – tiene 12 km De altura. Es donde se llevan a cabo los fenómenos meteorológicos, esta capa contiene el 80% de aire.

La estratósfera –comprende del kilometro 12 al 45. En ella el aire es más escaso, la principal importancia de esta región es que en ella se encuentra la capa superior de ozono a 20 km de altura de la superficie terrestre, funciona como filtro para evitar que lleguen hasta nosotros los rayos ultravioleta provenientes del sol.

La mesósfera – se extiende del kilometro 45 al 85.

La termósfera – abarca de los 85 a los 500 kilómetros.

La ionósfera – se encuentra a 500 km.

CONTAMINACIÓN DEL AIRE.

Un contaminante atmosférico es el que tiene concentraciones que exceden en forma significativa a las concentraciones de gases y partículas del medio ambiente en condiciones normales.

Es la presencia en la atmósfera de uno o más contaminantes en cantidades y duración tales que sean o tiendan a ser perjudiciales a la salud o bienestar humanos, a la vida de los animales o de las plantas, o que interfiera el goce de la vida o la propiedad.

En general la mayoría de las definiciones dividen a los posibles contaminantes en: polvo, vapores, niebla, líquidos, humo, otras materias particuladas, gas, sustancias olorosas, o cualquier combinación de las mismas, pero que no incluyen el vapor de agua no combinada.

Un método para definir un contaminante del aire consiste, primero en especificar la composición del aire atmosférico seco y luego clasificar todos los otros materiales presentes, como contaminantes, si su presencia daña a personas, plantas, animales o materiales.

CONTROL.

El control racional de la contaminación del aire se apoya en cinco suposiciones básicas:

1. El aire es del dominio público.
2. La contaminación del aire constituye un problema inevitable de la vida moderna.
3. Se pueden aplicar los conocimientos científicos para delinear las normas públicas.
4. La información acerca de las fuentes y efectos de la contaminación del aire dista mucho de ser completa, y se debe trabajar mucho a fin de crear dispositivos y métodos de control.
5. Los métodos para reducir la contaminación del aire no debe aumentar dicha contaminación en otros sectores del ambiente

I.1.2 ASPECTOS DE METEOROLOGÍA

Todos los contaminantes del aire siguen un ciclo que se inicia con su emisión, seguido por su transporte y difusión en la atmósfera. El ciclo se completa cuando los contaminantes se depositan o se combinan y reaccionan para formar otros. En algunos casos, los contaminantes se pueden volver a introducir en la atmósfera por la acción del viento.

En aquellas regiones donde las condiciones topográficas y meteorológicas conducen a la acumulación y concentración de los contaminantes pueden acelerar el deterioro de los edificios y afectar la salud pública, así como a la vegetación en el área. Durante el período en que el viento arrastra los contaminantes, pueden experimentar cambios físicos y químicos.

En las grandes áreas urbanas, los contaminantes emitidos, se dispersan sobre toda el área geográfica dependiendo de las condiciones atmosféricas.

Es necesario establecer los patrones de transporte y dispersión para las áreas consideradas, basándose en modelos matemáticos de la atmósfera local. Después que se suministran los datos conocidos de las tasas de emisión para el área, al modelo de dispersión, se podrán trazar mapas para las concentraciones estimadas de los varios contaminantes en toda la región.

Los modelos son también importantes para pronosticar la influencia de las nuevas fuentes (futuras), sobre la calidad del aire, y cuáles deberán ser las normas de emisión que se deben establecer para estas nuevas fuentes, a fin de mantener el nivel deseado de la calidad del aire.

La dispersión de un contaminante en la atmósfera es el resultado de tres mecanismos dominantes:

- El movimiento medio general del aire que transporta el contaminante en la dirección del viento.
- Las fluctuaciones turbulentas de la velocidad que dispersan el contaminante en todas direcciones.
- La difusión de masa debida a los gradientes de concentración.

Además, las características aerodinámicas generales, como el tamaño, forma y peso, afectan la tasa a la que las partículas de contaminantes no gaseosos se sedimentan en el terreno o son mantenidas en el aire.

LA DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES DEL AIRE Y EL CLIMA

La mayoría de los contaminantes del aire están contenidos en gases que son mucho más calientes y ligeros, en consecuencia tienden a elevarse. Conforme los gases ascienden, se mezclan con el aire que los rodea, se vuelven progresivamente más fríos y por lo tanto se elevan más despacio. La elevación de la mezcla de aire y los gases contaminantes depende de los cambios en la temperatura del aire mediante el incremento de la altura.

TASA DE DECLINACIÓN ADIABÁTICA

Por lo regular, en la tropósfera el aire se enfría según asciende. Si una porción de aire pasa de un nivel bajo a una altitud mucho más elevada y no intercambia calor con el aire de su contorno, se expande conforme la presión decrece y se enfría. Esta disminución de la temperatura se conoce como **tasa de declinación adiabática**, la cual es de 10°C por 100 m de elevación para aire seco (como se muestra en la Figura I.1).

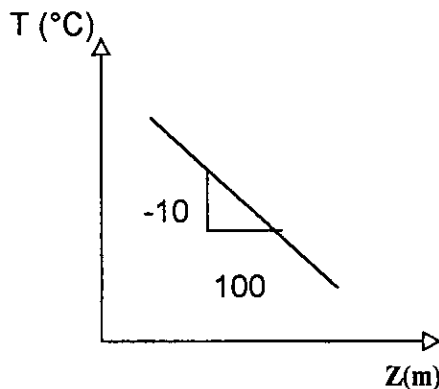


Figura I.1 – Tasa de Declinación Adiabática

A la inversa, si la porción de aire se comprime conforme cae, la temperatura se incrementará a una tasa similar.

Mientras que la disminución teórica de la temperatura con la altura es la tasa de declinación adiabática, los cambios efectivos pueden ser muy diferentes debido al efecto de los vientos, la luz solar y la topografía. Si la tasa de disminución de la temperatura es más grande que la tasa de declinación adiabática, un cuerpo de aire caliente se elevará rápidamente como si fuera una pluma de humo; en este caso, la situación se considera "inestable". Bajo estas condiciones, los contaminantes del aire se dispersan rápidamente.

Estabilidad atmosférica

Es necesario conocer el grado de estabilidad de la atmósfera si se desea estimar su capacidad para dispersar los contaminantes que recibe de las fuentes producidas por el hombre.

La dispersión de los contaminantes en la atmósfera depende de dos aspectos :

- El gradiente de temperatura
- La turbulencia mecánica debida a la acción del viento

Para conocer el grado de estabilidad de la atmósfera se debe comparar la tasa de cambio adiabática con el gradiente real de temperatura (tasa de cambio real).

Atmósfera Estable- es aquella que no muestra mucho mezclado o movimientos verticales, es decir, cuando la tasa de cambio real es menor que la tasa de cambio adiabática.

Atmósfera Inestable- se presenta cuando la tasa real es mayor que la tasa de cambio adiabática.

Atmósfera Neutra – se presenta cuando la tasa real es muy parecida a la tasa de cambio adiabática (ver Figura I.2)

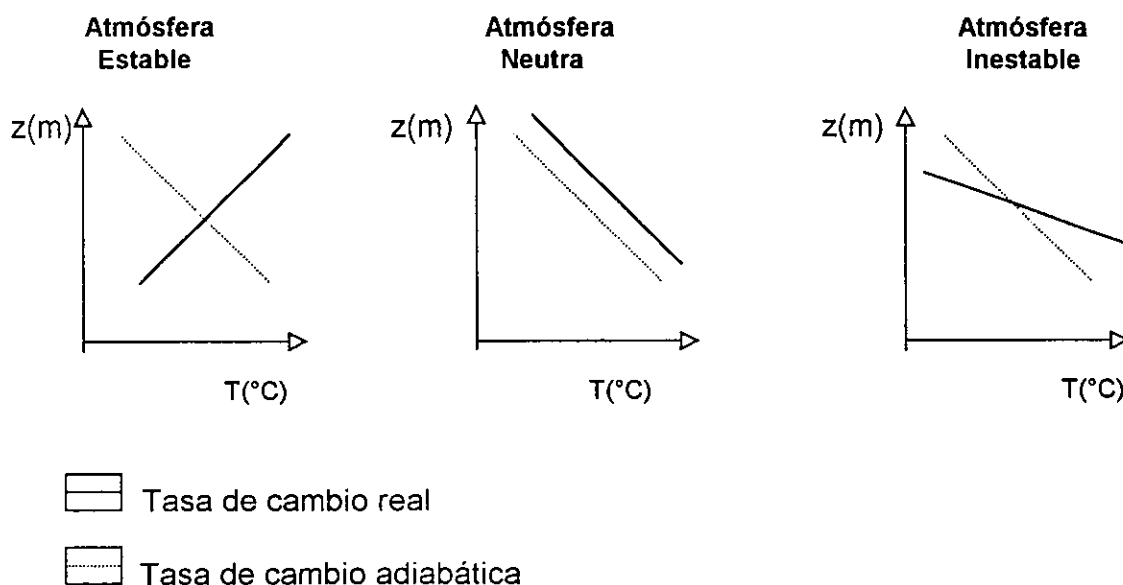


Figura I.2 Tipos de estabilidad de la Atmósfera

ISLA DE CALOR

La diferencia de la temperatura entre las ciudades y sus alrededores influye sobre otros factores meteorológicos como circulación de aire, precipitación pluvial y horas de luz solar. A esto se le llama efecto de "isla de calor", el fenómeno consiste en una pluma de calor al centro que se rellena mediante un flujo de aire desde las inmediaciones, el cual, asimismo, se reabastece por el ahora aire frío que desciende sobre la ciudad. Las partículas y otros contaminantes que se forman en este aire circulante, producen un domo de niebla sobre la ciudad.

RADIACIÓN SOLAR

La máxima intensidad de la radiación solar tiene lugar con longitudes de onda entre 0.4 y 0.8 μm , que es esencialmente la porción visible del espectro electromagnético. Aproximadamente el 42% de esta energía es:

- 1) Absorbida por la atmósfera alta
- 2) Reflejada al espacio por las nubes
- 3) Vuelta a dispersar por la atmósfera
- 4) Reflejada por la superficie terrestre
- 5) Absorbida por el vapor de agua y las nubes.

Aproximadamente el 47% de la radiación solar es absorbida por las superficies acuáticas y terrestres de nuestro planeta.

La Tierra, considerada como un cuerpo a 2900°K (620°F) emite radiaciones de onda larga con su máxima intensidad entre 4 y 12 m (cerca de la región infrarrojo). Tanto el vapor de agua como el dióxido de carbono son transparentes para la mayoría de la radiación solar pero absorben la radiación de onda larga procedente de la superficie terrestre, esto causa un calentamiento de la atmósfera, que dependerá de la cantidad de H_2O y CO_2 presentes. Este efecto se conoce como el "efecto de invernadero".

Por otra parte, uno de los resultados de la industrialización en todo el mundo lo constituye el aumento en la emisión de partículas. Las partículas en la atmósfera tienden a bloquear el paso de la radiación solar hacia la superficie de la Tierra. Este efecto de bloqueo se opone al causado por el aumento en la concentración de CO_2 y vapor de agua en la atmósfera.

La insolación, es decir, la cantidad de radiación solar que llega a un área unitaria de la superficie terrestre, es función de la localización, la estación del año, la hora del día y la composición de la atmósfera sobre la superficie, siendo el factor más importante la variación del ángulo de incidencia de los rayos solares.

La cantidad de radiación solar incidente absorbida en la superficie del terreno es una función de la absorbancia de dicha superficie.

VIENTO

El calentamiento del suelo y la atmósfera de la Tierra por la radiación solar forma un sistema dinámico muy grande. El sobrecalentamiento diferencial del aire origina gradientes de presión horizontales, los que a su vez conducen a un movimiento horizontal en la atmósfera. Por tanto, la diferencia de temperatura entre las atmósferas en los polos y en el ecuador, y la existente entre los continentes y los océanos, es causa de los movimientos a gran escala del aire.

El aire tiende normalmente a fluir de las regiones de alta presión hacia las regiones de baja presión. La rotación de la Tierra altera esta situación, ya que debe tomarse en cuenta la fuerza de Coriolis originada por este movimiento. La velocidad del viento y la fuerza de Coriolis provocan que el viento tienda a soplar paralelamente a las curvas isobáricas. Los meteorólogos llaman a este viento ideal o conceptual el viento geostrófico.

En meteorología se hace referencia frecuentemente al viento gradiente, el cual está asociado con las curvas isobaras. En el hemisferio norte, el movimiento del viento contrario a las manecillas del reloj se llama ciclón y el movimiento en el sentido de las manecillas del reloj, alrededor de un centro de presión se denomina anticiclón.

Los vientos geostróficos y de gradiente constituyen conceptos de interés práctico en ausencia de una fuerza significativa de fricción. No obstante, el movimiento del aire cerca de la superficie terrestre está retrasado por los efectos de fricción de la rugosidad superficial. La región vertical entre la superficie de la Tierra y los niveles superiores de la atmósfera donde resulta válido el concepto de viento gradiente se llama capa límite planetaria. La magnitud de retraso de la velocidad del viento con la altura y el espesor de la capa límite son funciones de la rugosidad superficial del terreno, así como del gradiente de temperatura en la atmósfera inferior. Los contaminantes en esta capa inferior de la atmósfera serán arrastrados hacia arriba y, por lo general, se dispersarán sobre una amplia área. Además, según se eleva el aire, se enfrían como resultado de la disminución de la presión a mayores elevaciones.

El desplazamiento angular del viento en la capa límite planetaria tiene una importante repercusión sobre el patrón de dispersión de los contaminantes. Como la fuerza de retraso por fricción varía con la altura del suelo, la cantidad de desplazamiento angular varía también con la altura. La fuerza de fricción en la capa límite tiene un máximo cerca de la superficie de la Tierra y cae esencialmente a cero en la parte superior de la capa límite, donde predomina el viento geostrófico o el gradiente (Ver Figura I.3).

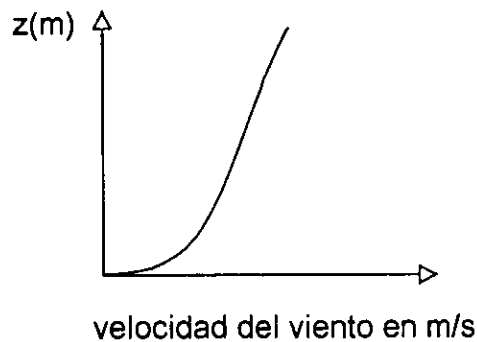


Figura I.3 Relación Velocidad del viento - Altura

Para conocer la velocidad del viento no se dispone de ninguna expresión analítica satisfactoria, por lo que de manera aproximada se acepta la siguiente expresión :

$$\frac{u}{u_1} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^p \quad \text{Ec.1}$$

donde :

u = velocidad del viento a la altura z

u_1 = velocidad del viento a la altura z_1

p = exponente positivo entre 0 y 1

$$p = n (2-n)^{-1}$$

donde "n" depende de la estabilidad de la atmósfera

$n = 0.20$, para condición inestable.

$n = 0.33$, para condición neutra.

$n = 0.50$, para condición estable.

I.1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y SUS EFECTOS EN EL AMBIENTE

Los contaminantes del aire pueden ser clasificados de acuerdo a su origen, composición química o al estado de la materia. A continuación se describen cada una de las clasificaciones.

CLASIFICACIÓN DE ACUERDO AL ESTADO DE LA MATERIA

Los contaminantes pueden también clasificarse como partículas o gases. Las partículas suspendidas en la atmósfera se dividen en sólidas y líquidas; entre ellas se incluyen vapores, humo, neblina, polvo, niebla y aerosoles.

Los gases incluyen vapores de sustancias que son líquidas o sólidas a temperatura y presión normales. Los gases contaminantes más comunes son: óxidos de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y óxidos en general. En el Cuadro I.1 se muestra una clasificación general de los contaminantes

Cuadro I.1 Clasificación de acuerdo al estado de la materia de los contaminantes atmosféricos

PARTÍCULAS	GASES
Polvo Fino	Compuestos que contienen azufre
Polvo grueso	Compuestos orgánicos
Vapores	Compuestos que contiene nitrógeno
Aerosoles	Monóxido de carbono
	Compuestos halogenados
	Compuestos radioactivos

Tipos de partículas.

Las partículas se dividen en polvo, humos, emanaciones, cenizas volátiles, vapores y sprays (rocíos).

Polvos.- Son partículas sólidas pequeñas formadas por la ruptura de masas mayores mediante trituración, molienda, o detonación, que pueden provenir directamente del procesado o del manejo de materiales como el carbón, cemento o granos. Pueden ser el producto de un proceso mecánico como el aserrado de madera o una tolvanera capaz de suspender las partículas en el aire o en algún otro gas sin llegar a disolverse, depositándose posteriormente bajo la influencia de la gravedad.

Humos.- Son partículas sólidas finas resultado de la combustión incompleta de materiales orgánicos como el carbón, la madera o el tabaco, constituido principalmente por carbón y algún otro material combustible. Tienen diámetros dentro del rango de 0.5 a 1 μm .

Emanaciones.- Son partículas sólidas finas (frecuentemente óxidos metálicos como el de zinc) formados por la condensación de vapores de materiales sólidos, producto de la destilación, sublimación, calcinación o del moldeado de metales. Su rango de tamaño es de 0.03 a 0.3 μm . Se floclan y agrupan hasta sedimentarse.

Cenizas volátiles.- Consisten en partículas no combustibles finamente separadas suspendidas en gases emanados por chimeneas provenientes de la combustión de carbón. Inertes en el carbón, estas sustancias minerales o metálicas se desprenden cuando se quema la parte orgánica del carbón. Las cenizas volátiles comparten todas las características de las partículas estudiadas, ya que como el polvo, su tamaño varía de 1 a 1000 μm , al igual que los humos son resultado de la combustión y al igual que las emanaciones contienen metales inorgánicos o sustancias minerales.

Vapores.- Se forman por partículas líquidas o gotas pequeñas generadas por la condensación de algún vapor, la dispersión de algún líquido, o el resultado de alguna reacción química (como la formación de vapor de ácido sulfúrico). Los vapores generalmente miden menos de 10 μm de diámetro. La visibilidad disminuye considerablemente con altas concentraciones de vapor, denominándosele niebla.

Aerosoles.- Consisten en partículas líquidas formadas por la atomización de líquidos fuente, como los pesticidas y herbicidas. El rango de tamaño de los rocíos es de 10 a 1000 μm .

CLASIFICACIÓN DE ACUERDO AL ORIGEN DE LOS CONTAMINANTES

Los contaminantes pueden ser considerados como primarios o secundarios de acuerdo a su origen.

Los contaminantes primarios son emitidos directamente a la atmósfera permaneciendo en su forma original, entre ellos se encuentran los óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y los hidrocarburos (HC).

Los contaminantes secundarios se forman en la atmósfera por reacciones fotoquímicas, por hidrólisis o por oxidación entre los contaminantes primarios y las sustancias químicas que se encuentran usualmente en la atmósfera, de este tipo son el ozono (O_3) y el nitrato de peroxiacetilo (NPA), entre otros.

CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A SU COMPOSICIÓN QUÍMICA

De acuerdo a su composición química pueden ser clasificados en orgánicos o inorgánicos.

Los compuestos orgánicos contienen carbono e hidrógeno y muchos de ellos contienen elementos como oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre.

Los compuestos inorgánicos no contienen en su composición hidrógeno y carbono y se les encuentra combinados con oxígeno, fósforo y azufre.

Efectos de los principales contaminantes

Partículas:

Es un término que se emplea para describir las materias sólidas y líquidas dispersas y arrastradas por el aire, mayores que las moléculas individuales, aproximadamente $0.0002 \mu\text{m}$ de diámetro pero menores de $500 \mu\text{m}$. Las partículas en este rango de tamaño tienen una vida media en suspensión que varía desde unos cuantos segundos hasta varios meses. Las partículas menores de $0.1 \mu\text{m}$ experimentan movimientos brownianos aleatorios resultantes de la colisión con las moléculas individuales.

Una porción de las partículas introducidas en la atmósfera por las actividades del hombre sirven como núcleos de condensación que influyen en la formación de nubes, lluvia y nieve.

En el Cuadro I.2 observamos los efectos de las partículas de acuerdo a su concentración en la atmósfera.

Cuadro I.2
Efectos de las partículas de acuerdo a su concentración en la atmósfera

CONCENTRACIÓN	EFFECTOS
60-180 μm	Aceleración en la corrosión de las láminas de acero y zinc.
150 μm	Visibilidad reducida a 8 Km.
100-150 μm	Luz solar directa reducida en un tercio
80-100 μm	Puede ocurrir un aumento en la mortalidad de personas mayores de 50 años.
100-130 μm	Es posible que los niños experimenten un aumento en la incidencia de las enfermedades respiratorias.
200 μm	La morbilidad de los obreros industriales puede ser causa de un aumento en el ausentismo
300 μm	En los pacientes con bronquitis crónica se puede presentar agravamiento de síntomas.
750 μm	Puede ocurrir un número excesivo de muertes y un considerable aumento de las enfermedades.

Monóxido de Carbono (CO)

Es un gas incoloro, inodoro, insípido y químicamente estable; bajo condiciones normales, su tiempo estimado de permanencia en la atmósfera es de dos a cuatro meses. Se forma por un proceso incompleto de combustión del carbono o de sus compuestos.

Fuentes de emisión.- Es común que se forme en los vehículos con motores de combustión interna, en consecuencia, este producto se acumula en las zonas urbanas, cerca de las vías rápidas y de las calles de gran movimiento y su concentración varía conforme aumenta o disminuye la circulación.

Efectos.- A los niveles de concentración en que se encuentra en el aire urbano, no parece afectar a las plantas pero con altas concentraciones se convierte en un veneno para los seres humanos, ya que interfiere con el transporte de oxígeno en la sangre, causando la muerte a concentraciones mayores de 750 ppm.

La combinación del monóxido de carbono con la hemoglobina se denomina carboxihemoglobina (COHb). Esto se debe a que la hemoglobina tiene una afinidad con el CO de aproximadamente 210 veces su afinidad por el oxígeno.

Afortunadamente, la formación de carboxihemoglobina (COHB) en el torrente sanguíneo es un proceso reversible. Cuando cesa la exposición, el CO que se combinó con la hemoglobina es liberado espontáneamente, y la sangre queda libre de la mitad de su monóxido de carbono en un lapso de 3 a 4 horas en pacientes saludables. Hasta llegar a su nivel normal de 0.4 por ciento de COHB producido por el cuerpo humano.

Oxidos de Azufre (SO_x)

El dióxido de azufre (SO₂) y el trióxido de azufre (SO₃) son los óxidos del azufre dominantes en la atmósfera. El SO₂ es un gas incoloro, no flamable y no explosivo que produce una sensación gustatoria a concentraciones de 0.3 a 1.0 ppm en el aire. A concentraciones mayores de 3.0 ppm, tiene un olor picante, es sofocante e irritante.

Fuentes de emisión.- El SO₂ es un contaminante del tipo primario que se produce en la combustión de carbón y petróleo que lo contienen. Se convierte parcialmente a trióxido de azufre o ácido sulfúrico mediante procesos fotoquímicos o catalíticos en la atmósfera.

Algunos procesos industriales emiten trióxido de azufre (SO₃) el cual se forma también en la atmósfera en pequeñas cantidades. El trióxido de azufre forma ácido sulfúrico con la humedad del aire.

Efectos.- Los compuestos de azufre son responsables de los daños más importantes ocasionados a los materiales. Producen un aumento en el tiempo de secado de una capa de pintura y menor duración cuando se aplica en presencia de SO₂. Por lo general los óxidos de azufre aceleran la corrosión del metal al formar primero ácido sulfúrico ya sea en la atmósfera o sobre la superficie del metal, llegando a tener un aumento de 1.5 a 5 veces en una atmósfera urbana con respecto a un ambiente rural.

Los ácidos sulfurosos son capaces de atacar una amplia variedad de materiales de construcción, incluyendo caliza, mármol, pizarras de techo y morteros. Se forman sulfatos bastante solubles, que luego lava la lluvia. Los textiles de nylon son susceptibles a los contaminantes de la atmósfera.

El hombre y varias especies de animales, reaccionan ante el dióxido de azufre (SO₂) con broncoconstricción, este efecto sobre los bronquios se puede evaluar en términos de un ligero aumento en la resistencia en el conducto de aire. El ácido sulfúrico es un irritante mucho más potente para el hombre que el dióxido de azufre. El óxido de azufre en combinación con partículas y humedad relativa es un peligro potencialmente serio para la salud. En el Cuadro I.3 se presentan datos típicos de concentración y efectos asociados sobre la salud.

Cuadro I.3
Datos típicos de concentración y efectos asociados sobre la salud

Concentración (ppm.)	Efectos
0.03 promedio anual	Lesiones crónicas en plantas
0.037-0.092 promedio anual	Síntomas respiratorios mínimos
0.11-0.19 media en 24 h	Problemas respiratorios en personas de edad avanzada
0.19 media en 24 h	Con niveles bajos de partículas puede haber aumento en la mortalidad
0.3 promedio en 24 h	Algunos árboles muestran lesiones

Hidrocarburos (HC)

Los compuestos orgánicos que contienen solamente carbón e hidrógeno son clasificados como hidrocarburos.

Fuentes de emisión.- Las mayores fuentes de compuestos orgánicos volátiles (hidrocarburos) son los automóviles y otras fuentes móviles, de las cuales se expelen al aire pequeñas cantidades de combustible no quemado. También la producción de petróleo, refinación y evaporación de solventes usados en la fabricación de pinturas emiten hidrocarburos a la atmósfera. Las principales fuentes naturales de hidrocarburos son los incendios forestales, áreas geotérmicas, gas natural de depósitos petrolíferos y depósitos de carbón.

Efectos.- Los hidrocarburos no parecen causar ningún daño corrosivo apreciable en los materiales. Las partículas o el hollín procedente de los hidrocarburos no quemados, ensucian las superficies.

De todos los hidrocarburos, sólo el etileno tiene efectos adversos sobre las plantas ante concentraciones ambientales conocidas; su efecto principal es inhibir el crecimiento de las plantas.

No se han encontrado efectos adversos de hidrocarburos gaseosos sobre la salud del hombre a concentraciones ambientales, a excepción de los hidrocarburos aromáticos que se encuentran en el hollín y los alquitranes los cuales tienen propiedades cancerígenas.

Los hidrocarburos no quemados, en combinación con los óxidos de nitrógeno y en presencia de la luz solar, forman oxidantes fotoquímicos, componentes del smog fotoquímico, los que tienen efectos adversos en la salud del hombre y de las plantas.

Oxidos de Nitrógeno (NO_x)

De los seis o siete óxidos de nitrógeno, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) son importantes contaminantes del aire

Fuentes de emisión.- Se forman cuando se quema cualquier combustible a muy alta temperatura. También los átomos de nitrógeno presentes en algunos combustibles pueden contribuir a la emisión de óxidos de nitrógeno.

Efectos.- El NO causa daños directos a los materiales; sin embargo, el NO₂ puede reaccionar con la humedad presente en la atmósfera para formar ácido nítrico que puede ser causa de considerable corrosión en las superficies metálicas. El dióxido de nitrógeno absorbe la luz visible y a una concentración de 0.25 ppm causa apreciable reducción de la visibilidad.

El dióxido de nitrógeno a una concentración de 0.5 ppm en un periodo de 10 a 12 días detiene el crecimiento de plantas tales como el frijol pinto y el tomate. Experimentos con naranjas sin semilla muestran que se reduce el rendimiento ante una prolongada exposición del NO_2 a concentraciones de 0.25 a 1.0 ppm.

En el ser humano el dióxido de nitrógeno actúa como un fuerte irritante y a iguales concentraciones es más dañino que el NO . Sin embargo, a concentraciones encontradas en la atmósfera, el NO_2 es solo irritante y potencialmente relacionado con la fibrosis pulmonar crónica. Se ha observado un aumento de bronquitis en niños de 2 a 3 años de edad a concentraciones por debajo de 0.01 ppm.

Oxidantes Fotoquímicos

Los agentes fotoquímicos, ozono (O_3), nitrato de peroxiacetilo (NPA), nitrato de peroxibencilo (NPB), y otras trazas de sustancias que pueden oxidar el ion yoduro del yoduro de potasio, se conocen como oxidantes fotoquímicos.

Fuente de emisión.- No son emitidos por alguna fuente en particular, pero se forman por reacciones complejas en la atmósfera que involucran a los compuestos orgánicos volátiles (hidrocarburos), a los óxidos de nitrógeno y la luz solar. Este puede ser un problema serio en áreas urbanas de climas templados a cálidos, como la Ciudad de México. En el Cuadro I.4 se muestra un resumen de las fuentes de emisión más importantes

Efectos.- Los aerosoles formados durante las reacciones químicas que crean el smog causan una notable reducción de la visibilidad, y dan a la atmósfera un matiz pardusco.

El ozono ataca al hule sintético, con lo que reduce la vida de las llantas, el aislamiento de hule, etc. También ataca la celulosa de los textiles y decolora las telas. En el Cuadro I.5 se muestra los efectos generales de la contaminación sobre los materiales.

Cuadro I.4
Cuadro resumen de las fuentes de emisión de contaminantes

GAS	FUENTES MÁS IMPORTANTES	FUENTES NATURALES
SO ₂	Combustión del petróleo	Volcanes
H ₂ S	Procesos químicos	Acción biológica de pantanos
CO	Vehículos	Acción bacteriana en los suelos
NO ₂	Combustión	Descomposición biológica
NH ₃	Tratamientos residuales	Biológicas
CO ₂	Combustión	Biológicas
HC _s	Combustión y procesos Químicos	

Cuadro I.5
Efectos de la contaminación sobre los materiales

MECANISMO DE DETERIORO	PROCESO
ABRASIÓN	Las partículas al moverse chocan con las estructuras
DEPOSITACIÓN Y REMOCIÓN	Al limpiar frecuentemente las estructuras, tienden a desgastarse
ATAQUE QUÍMICO DIRECTO	Oxidación, y reacciones con el agua
ATAQUE QUÍMICO INDIRECTO	Cuando los contaminantes penetran en el material y reacciona con el
CORROSIÓN	Por reacciones químicas con los materiales

I.2 Generalidades del control de contaminantes atmosféricos generados por fuentes fijas

I.2.1 Procesos de medición y métodos de monitoreo de emisiones contaminantes

Mejorar o aun preservar la calidad del aire requiere de la medición de las concentraciones de los contaminantes en la atmósfera. Tal medición sirve para varias funciones vinculadas pero definibles:

- La medición proporciona los datos necesarios sobre los cuales es posible determinar la relación de los efectos con los niveles de los contaminantes.
- La medición provee un criterio cuantitativo sobre si los estándares de calidad del aire se están logrando o superando y en qué grado.
- La medición es necesaria para determinar si algunos cambios nocivos en los niveles Ambientales globales de los contaminantes están ocurriendo como resultado de las actividades del hombre.
- La medición proporciona los datos para determinar el destino de los contaminantes en la atmósfera y, junto con la información meteorológica, es un auxilio para modelar y por consiguiente para predecir la relación entre concentraciones, emisiones y condiciones climáticas.
- Las mediciones de la fuente proveen información acerca de las emisiones y, donde es aplicable, si el emisor está logrando el estándar regulador.

Cuanto más se aproxime uno a la medición del tiempo real, más costoso se volverá el equipo necesario debido a la mayor sensibilidad requerida y a la cantidad de datos que se han de almacenar y procesar. Para una muestra colectada, el tiempo promedio corresponde al tiempo que se empleó en el muestreo y al tiempo de respuesta del instrumento cuando se trata de un instrumento de campo con respuesta directa a los cambios en la concentración.

El tiempo de respuesta que se requiere para determinar los efectos sobre la salud humana es una función del tiempo de respuesta del cuerpo a los cambios en las concentraciones de contaminantes en la atmósfera.

Con frecuencia las concentraciones Ambientales de contaminantes son del rango de partes por billón (ppb) o menos. Esto requiere técnicas analíticas muy complicadas, libres de interferencias causadas por algunos de los muchos otros constituyentes atmosféricos.

Medición de Concentraciones en el Ambiente

Hasta hace poco tiempo, solo era posible medir las cantidades promedio de contaminantes en el aire durante cierto periodo y a partir de estas mediciones establecer las tendencias a largo plazo en los niveles de contaminación. Ahora se practica en algunas áreas industriales, la utilización de mediciones virtualmente instantáneas que se obtienen en forma continua a partir de una red de estaciones de monitoreo (monitoreo de tiempo real) para modificar la actividad industrial y reducir los niveles elevados de contaminación bajo condiciones adversas de clima. No obstante, los métodos clásicos para tomar muestras durante cierto periodo a fin de evaluar la contaminación del aire se continúan utilizando porque, los monitoreos de tiempo real son más costosos y no siempre necesarios. El muestreo seguido por análisis es el único método satisfactorio para determinar la composición de partículas y para analizar las muestras atmosféricas de hidrocarburos individuales.

Material particulado

La más vasta cantidad de partículas que se transportan por aire se puede colectar conforme éstas caen y salen de la atmósfera; por lo general se depositan dentro de un recipiente cilíndrico de dimensiones estándar, el cual tiene un embudo sobre la parte superior y contiene agua adicional para evitar rearrastre de las partículas. Este método no proporciona resultados que sean representativos de las concentraciones de partículas en la atmósfera, debido a que sólo las partículas más grandes ($> 20 \mu\text{m}$) son lo bastante pesadas como para que se depositan de esta manera sin afectarse debido a los movimientos del viento. La masa total de partículas coleccionadas es una función del diseño del colector y las comparaciones sólo son de utilidad cuando se realizan entre colectores de diseño idéntico (es decir, colocados a la misma altura sobre una superficie similar). Este método tiene ciertos factores a su favor:

- Es económico
- Requiere poca atención
- Las muestras sólo se coleccionan y pesan cada treinta días.

El uso principal de este método consiste en estudiar las tendencias durante un periodo largo y las distribuciones de las emisiones a partir de una fuente singular bajo condiciones variantes. Ya que la precipitación de polvo fue la primera de las técnicas de colecta para partículas en estandarizarse y mostrar una medida de las tendencias de la calidad del aire en los sitios donde se pusieron los colectores. Por lo general, los resultados se informan como masa por unidad de área por mes. La extrapolación de estos resultados para dar una precipitación total se debería evitar debido a las dificultades implícitas en la interpretación de los resultados en términos absolutos.

Otro método que se utiliza con frecuencia para determinar los niveles de partículas consiste en arrastrar el aire contaminado a través de un filtro y medir el grado de ensuciamiento, ya sea mediante la medición de la disminución en transmitancia de la luz del filtro (coeficiente de neblina) o la disminución en reflectancia (unidades de reflectancia de sombra de suciedad). Estas mediciones tienen la ventaja de no requerir una gran muestra.

Las concentraciones de masa atmosférica por unidad de volumen se obtienen, por lo general, mediante el uso de un colector de muestras de "alto volumen" que absorbe un volumen conocido de aire a través de un filtro. Los filtros de alta eficiencia que se utilizan colectan casi el 100% del polvo superior a 0.1 o 0.2 micrómetros de diámetro. Los colectores de alto volumen con flujos de aire grandes, 1-2 m³ por minuto, y grandes entradas de aire, 150 por 200 mm, colectan una muestra de partículas atmosféricas cuya representatividad no resulta afectada a causa de las condiciones meteorológicas.

La concentración de partículas se obtiene al pesar el filtro a humedad constante, tanto antes como después de la colecta, y al dividir el cambio de la masa por el total del flujo del aire.

También se encuentran disponibles colectores de muestras que separan a las partículas en fracciones de diferente tamaño al hacer uso de las propiedades aerodinámicas de las partículas de diferentes dimensiones. Una variedad de técnicas analíticas se encuentran asequibles para determinar la concentración de los componentes de interés en las partículas colectadas. Los iones metálicos, tales como plomo, cadmio, mercurio y cinc son los que más comúnmente se determinan mediante absorción atómica después de digestión ácida para extraer los metales de interés.

Los componentes orgánicos de los aerosoles se determinan, primero al obtener la muestra en solución mediante el uso de técnicas de extracción por solventes los cuales no descomponen los compuestos de almacenamiento. La detección de los compuestos separados se puede realizar mediante espectroscopia ultravioleta, la cual es apropiada para la mayoría de compuestos orgánicos, o espectroscopia fluorescente, la cual es más sensible, pero sólo útil para compuestos que fluorescen con luz ultravioleta. Este último grupo incluye los hidrocarburos poliaromáticos potencialmente cancerígenos.

Contaminantes gaseosos

Los contaminantes gaseosos se pueden cuantificar en la atmósfera de tres maneras principales:

- Una muestra se puede coleccionar dentro de un recipiente vacío o una bolsa de plástico y transportar de regreso hacia el laboratorio para su análisis (muestreo de captura). Este método indica la concentración del contaminante en la atmósfera al instante en que la muestra se toma, siempre y cuando la muestra sea representativa. El retardo entre tomar la muestra de colecta y hacer la medición real puede resultar en pérdidas de la muestra debido a la absorción sobre la superficie del contenedor, o por la difusión hacia afuera del contenedor en el caso de bolsas de plástico. Estos problemas se pueden reducir mediante la preparación de los contenedores con la atmósfera sobre la cual se están consiguiendo las muestras.
- Las muestras se pueden coleccionar y concentrar al mismo tiempo por medio de absorción sobre sólidos absorbentes, absorción en solución o la combinación de estas dos. Luego, las muestras se retornan al laboratorio para análisis. Aquí, los problemas pueden ocurrir como consecuencia de concentrar contaminantes reactivos, lo cual aumenta su oportunidad de reacción antes del análisis. Respecto a especies orgánicas en fase gaseosa, las cuales no son reactivas en la oscuridad, con el uso de absorbentes sólidos se ha logrado tener mucho éxito.
- Los primeros métodos incluyeron la colección de contaminantes gaseosos por absorción en una solución, esto se lleva a cabo al arrastrar el aire a una velocidad conocida, primero a través de un filtro para remover partículas, y luego a través de la solución de absorción contenida dentro de un frasco colector de gas diseñado para asegurar que el gas que burbujea a través de él presente la máxima superficie expuesta hacia la solución. En muchos casos, la solución elegida tiene una reacción irreversible con el gas contaminante, mediante la cual lo fija en la solución.

Toda colecta con métodos de concentración requiere tiempos de muestreo finitos cuya duración depende de la concentración de las especies en la atmósfera; por consiguiente, proveen una concentración promedio sobre el período de muestreo. Se debe tener cuidado para asegurarse de que la muestra tomada es representativa del volumen de donde proviene. Finalmente, las concentraciones se pueden determinar en forma continua al utilizar una propiedad física del gas que se está midiendo, o una propiedad física del producto de una reacción específica controlada del gas que se está midiendo. La aplicación de estos planteamientos generales se considera enseguida para casos específicos.

Sistema Integral de Monitoreo Ambiental

El Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA), surgió con la finalidad de contar con información continua y fidedigna de los niveles de contaminación Ambiental en el Area Metropolitana. Así desde 1992 la población es informada ininterrumpidamente, de la calidad del aire que respiramos en el área metropolitana.

El SIMA fue concebido como una fuente de información de las condiciones Ambientales en el estado, por lo que apoya a las instituciones educativas y particulares con la transferencia de conocimientos a través de conferencias y visitas a su red de monitoreo Ambiental, además de informar de las variables de contaminación que son medidas en dicha red. La red de monitoreo consiste de 25 estaciones fijas de monitoreo Ambiental (Cuadro I.6), unidades móviles de monitoreo y un sistema Sodar-Doppler para la medición de las condiciones atmosféricas hasta una altura de 1500 metros y especialmente la detección de inversiones térmicas.

Cuadro I.6 Estaciones de la Red Automática de Monitoreo de la ZMCM

- 1- Lagunilla
- 2- Vallejo
- 3- Santa Úrsula
- 4- Tacuba
- 5- ENEP Acatlán
- 6- Los Laureles
- 7- La Presa
- 8- La Villa
- 9- San Agustín
- 10- Azcapotzalco
- 11- Tlanepantla
- 12- Xalostoc
- 13- Merced
- 14- Pedregal
- 15- Cerro de la Estrella
- 16- Plateros
- 17- Hangares
- 18- Iztapalapa
- 19- Aragón
- 20- Nezahualtcoyotl
- 21- I.M.P.
- 22- Benito Juárez
- 23- Taxqueña
- 24- Metro Insurgentes
- 25- Cuicláhuac

Las estaciones de monitoreo ambiental funcionan de manera continua y se operan automáticamente, solo es supervisada su operación desde el centro de cómputo de la Red de Monitoreo Ambiental.

Los contaminantes monitoreados en las estaciones de monitoreo Ambiental son:

- ♦ Partículas menores a 10 Micras
- ♦ Óxidos de Nitrógeno
- ♦ Ozono
- ♦ Bióxido de Azufre
- ♦ Monóxido de Carbono

Los parámetros meteorológicos medidos son:

- ♦ Dirección y velocidad de viento
- ♦ Temperatura
- ♦ Radiación solar
- ♦ Presión atmosférica
- ♦ Precipitación pluvial

Índice Metropolitano de la Calidad del Aire, IMECA

El Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA) fue creado con la finalidad de que la población en general comprenda los niveles de contaminación existentes en el aire, esto a través de implementar una escala igual para todos los contaminantes según su capacidad de ocasionar molestias al ser humano, (Cuadro I.7).

Cuadro I.7 Descriptores del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

IMECA	Descriptor
0 – 50	Situación muy favorable para la realización de todo tipo de actividades
51 – 100	Situación favorable para la realización de todo tipo de actividades
101 – 200	Aumento de molestias menores en la población sensible
201 – 300	Aumento de molestias e intolerancias relativas al ejercicio en la población con padecimientos respiratorios y cardiovasculares; aparición de ligeras molestias en la población en general
301 – 500	Aparición de diversos síntomas e intolerancia al ejercicio en la población en general

Se tienen niveles establecidos de concentración y tiempos de exposición de los contaminantes donde el ciudadano promedio puede desenvolverse sin que se afecte de forma significativa su salud, estos niveles son establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas para la Calidad del Aire. Los niveles de la Norma Ambiental para cada contaminante son diferentes, ya que la vulnerabilidad del ser humano es diferente ante cada tipo de contaminante. El IMECA toma el valor de concentración y el tiempo de exposición que establece la Norma Ambiental para cada contaminante y lo asigna a los 100 puntos IMECA de esta manera para cualquier contaminante se tiene la misma escala de ponderación en la unidad adimensional del IMECA (Ver Cuadro I.8).

Cuadro I.8 Concentraciones que equivalen a los 100 puntos IMECAS

Contaminante	Concentración	Tiempo de exposición (hrs)
Bióxido de Azufre (SO ₂)	0.13 ppm	24
Ozono (O ₃)	0.11 ppm	1
Bióxido de Nitrógeno (NO ₂)	0.21 ppm	1
Partículas Menores a 10 Micras	150 µg/m ³	24
Monóxido de Carbono (CO)	11.0 ppm	8

El Instituto Mexicano del Petróleo, dentro de un proyecto de investigación básica sobre materia particulada y deterioro atmosférico, ha diseñado una campaña para monitoreo y caracterización de partículas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

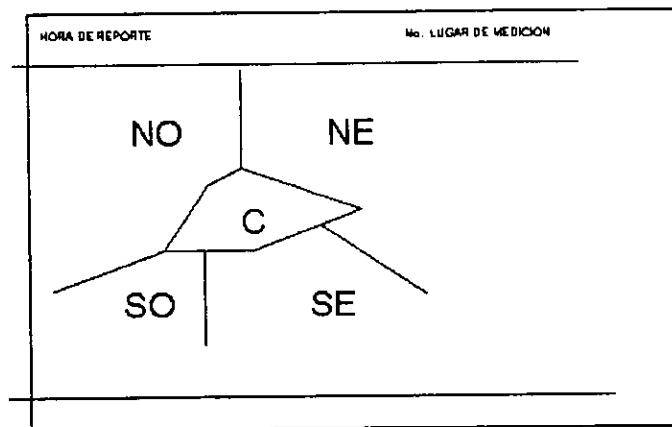
Se estima que durante este período, se incorporarán alrededor de 30 estaciones de monitoreo a nivel superficie a las 25 ya existentes. Se contará con un avión de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA) que monitoreará aproximadamente cien parámetros cada segundo, se traerán varias estaciones meteorológicas, se lanzarán globos y sondas meteorológicas.

El principal problema de contaminación atmosférica en la Ciudad de México, lo constituye el ozono, seguido por las partículas suspendidas. No obstante, a partir de 1991 esos elementos tendieron a disminuir, sobre todo el plomo, bióxido de azufre y monóxido de carbono, como consecuencia de la introducción de diesel con bajo contenido de azufre para ser utilizado como combustible en las diferentes industrias.

En el caso del ozono, Normalmente en la ZMCM se superan las Normas existentes casi 300 días al año y si bien es cierto que también tiene una tendencia a disminuir, ésta es muy baja y el cambio se da muy lentamente.

Utilizando datos provenientes de las treinta y dos estaciones de monitoreo existentes en la zona metropolitana, los investigadores analizan la información sobre los principales contaminantes existentes en la atmósfera y la variación de sus concentraciones a lo largo de las 24 horas del día.

Las características geográficas y meteorológicas son dos factores muy importantes que favorecen la formación de ozono en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Por el hecho de localizarse en una cuenca rodeada de montañas, el Valle de México recibe muy poca ventilación debido a que solamente cuenta con una muy estrecha entrada de vientos al norte de la ciudad por el Cerro Tres Cruces. Además, la altura promedio del Valle de México es de 2,400 metros de altura sobre el nivel del mar lo que hace que el contenido de oxígeno se reduzca en un 26% con respecto al nivel del mar. Todo esto, junto a una abundante radiación solar, debida a la latitud (19 grados Norte), propicia que se acumulen los contaminantes en esta zona (Ver Figura I.4).



Registro de los contaminantes en las diferentes zonas

Contaminante	NO	NE	C	SE	SW
O ₃					
SO ₂					
NO ₂					
CO					

Figura I.4 Forma de registro para contaminantes

I.2.2 Clasificación de los dispositivos de control

Los dispositivos de control se clasifican en: equipo para el control de partículas y equipo para el control de gases. En general se presentan cuatro clases básicas de equipos de colección de partículas, los cuales se muestran en el Cuadro I.9.

Cuadro I.9
Clases básicas de equipos de colección de partículas

EQUIPO	USO GENERAL CUANDO :
Separadores Ciclónicos (ciclones) - Ciclones secos - Ciclones con aspersion	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El polvo sea grueso ✓ Las concentraciones sean altas ✓ Se desea la clasificación de las partículas. ✓ No se requiera una eficiencia muy alta
Filtros de bolsa	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se requiera eficiencia muy alta ✓ Se deban colectar materiales secos de importancia comercial ✓ Los volúmenes sean razonablemente bajos ✓ Las temperaturas sean bajas.
Colectores húmedos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sea necesario eliminar partículas finas con una alta eficiencia. ✓ Sea deseable el enfriamiento y no sea indeseable la humedad. ✓ Sea necesario eliminar los contaminantes tanto gaseosos como partículas
Precipitadores electrostáticos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se requieran altas eficiencias de remoción de partículas finas. ✓ Sea necesario recuperar materiales valiosos sin modificaciones químicas.

Para el control de gases se tienen básicamente dos dispositivos que se presentan en el Cuadro I.10.

Cuadro I.10 Equipo básico para el control de gases

Equipo:	Características :
Dispositivos de incineración y combustión	Implica el tratamiento de los contaminantes del aire, del combustible y del monóxido de carbono mediante la oxidación completa a dióxido de carbono y agua
Torres empacadas	Se trata de transferir un contaminante de la fase gaseosa a la fase líquida, este es un proceso de transferencia de masa en el cual el gas se disuelve en el líquido

CAPITULO I

I LEGISLACIÓN AMBIENTAL RELATIVA A LA PREVENCIÓN Y CONTROL DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS GENERADOS POR FUENTES FIJAS

I.1 Problemática de la Contaminación Atmosférica

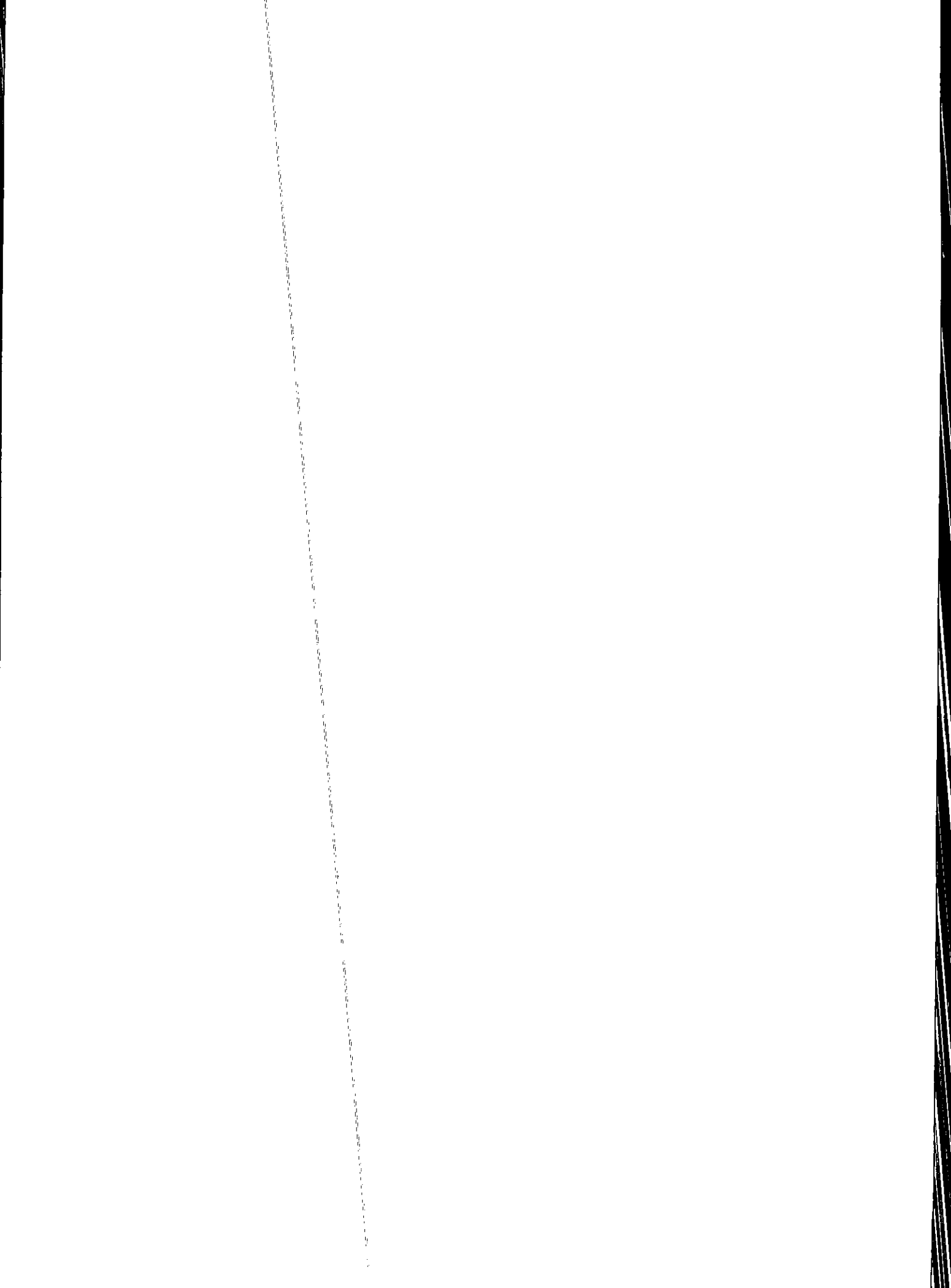
La contaminación atmosférica es uno de los problemas más trascendentes que afectan al país derivado principalmente de la dinámica de desarrollo. Se pueden señalar como causas primordiales del problema el rápido crecimiento demográfico que ha experimentado México en las últimas décadas y a la tendencia de la población y del desarrollo industrial a concentrarse en unos cuantos polos de desarrollo.

Las grandes zonas urbanas presentan los problemas críticos de contaminación; el 40% del total de los contaminantes emitidos a la atmósfera se generan en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey.

En la zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), el problema de la contaminación atmosférica reviste características graves como consecuencia de la excesiva concentración urbano-industrial y de las condiciones geográfica y meteorológicas de la región. En ella se localiza el 20% de los establecimientos industriales del país, el 40% de la inversión industrial y el 42% de la población económicamente activa.

En relación con las fuentes fijas, se estima en más de 30 mil el número de instalaciones industriales y de servicios; la mayor parte de ellas se localiza en el norte y noroeste de la ZMVM. Las emisiones principales provienen de las industrias: química, fundición del hierro y acero, textil, de minerales no metálicos, hulera, papelera, alimenticia, vidriera, de plásticos, de asfalto, de grasas, aceites y cementara. Destacan las refinerías y las termoeléctricas, que aportan el 37% del total de contaminantes provenientes de fuentes fijas. Los establecimientos de servicios utilizan en forma importante calderas, quemadores y hornos que liberan a la atmósfera bióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y partículas.

Cabe destacar la alta generación de polvo de algunas fuentes fijas por la falta de uso de filtros y de optimización de sistemas de colección. El uso de combustóleo produce también altas concentraciones de bióxido de azufre, debido al alto contenido de azufre en el petróleo crudo en el país. (Ver Cuadro I.1).



Cuadro I.1 Clasificación de las Fuentes Fijas por su Actividad.

FUENTES DE COMBUSTIÓN EXTERNA Combustión de carbón Combustión de combustóleo Combustión de leña Combustión de petróleo Combustión de gas
INDUSTRIA QUÍMICA Plásticos, Fibras, Hule Sintético Amoniaco, Jabón y Detergentes Ácido Clorhídrico Ácido Nítrico
INDUSTRIA METALURGICA Preparación del coque Industria del hierro y el acero Fundidoras
INDUSTRIA DE PRODUCTOS MINERALES Plantas de asfalto y de concreto Fábricas de tabiques Fabricación de vidrio
INDUSTRIA DEL PETRÓLEO Refinación Petroquímica
AGRICULTURA Y ALIMENTOS Tostado y Secado Fermentación Molinos Fertilizantes Procesamientos Industriales
FUENTES VARIAS Incendios Fumigación

Problemática del control.

La mayoría del equipo necesario para el control de los contaminantes atmosféricos generados por fuentes fijas instalado en las diferentes industrias ya cumplió con su vida útil, por lo que es necesario reemplazarlo o darle un mantenimiento correctivo. Sin embargo, dicho equipo no se fabrica en México por lo que se debe de importar, lo que trae como consecuencia que el control de contaminantes se vuelva costoso dentro de la producción de bienes y servicios.

Un primer paso que se debe de realizar dentro del control, es la constante medición de los contaminantes emitidos a la atmósfera por fuentes fijas, pero no se cuenta con el equipo indicado para realizar dichas mediciones, por lo que los resultados emitidos por las mediciones son poco confiables.

Un aspecto importante que se maneja dentro del control de contaminantes, es la difícil selección del equipo adecuado dependiendo de la actividad que se desarrolle, ya que no se cuenta con personal calificado para el diseño e instalación de dichos equipos. Actualmente el equipo existente en el mercado, se vende con pólizas de mantenimiento obligatorio, lo cual significa el tener que contratar los servicios de personal extranjero, que esté familiarizado con el equipo.

1.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

La atención al problema de la contaminación atmosférica fue iniciada a partir del año de 1959, por la Dirección de Higiene Industrial de la SSA, y en la década de los sesenta la Secretaría de Salubridad y Asistencia, inició programas, orientados al estudio del problema de contaminación atmosférica. En 1971 se empieza a instrumentar con el Reglamento Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental originada por la Emisión de Humos y Polvos.

En enero de 1972, por decreto presidencial se constituye la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente (SMA) dependencia que fue directamente responsable de la atención de este tipo de Problemas. La Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental publicada en el diario oficial de marzo de 1971, fue la primera que se aplicó en el país con un carácter amplio e integral en el rubro ambiental. Esta Ley y sus reglamentos, rigieron la prevención y el control de la contaminación y el mejoramiento, conservación y restauración del medio ambiente; de sus reglamentos destaca el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación atmosférica originada por la emisión de humos y polvos.

Posteriormente el Ejecutivo Federal consideró la conveniencia de proponer al Congreso de la Unión la nueva Ley Federal de Protección al Ambiente, que entró en vigor el 11 de febrero de 1982. En el contenido de esta Ley se estableció la integración de áreas o regiones ecológicas para la conservación de los ecosistemas en peligro de destruirse, la protección de la calidad del aire; y de los suelos, de la erosión, salinidad, desertificación y de la urbanización. Además consideró los efectos producidos por sustancias químicas tóxicas, radioactivas, mismas que pueden modificar el clima en algunas regiones y provocar la desaparición o reducción de especies, de la flora y fauna.

Para fortalecer las bases constitucionales en materia ambiental, en agosto de 1987 se reformaron los artículos 27 y 63 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, elevando al más alto rango la preservación y restauración del equilibrio ecológico. La reforma consistió en descentralizar las atribuciones de la Ley en las instancias del gobierno Federal, Estatal y Municipal para la protección de los recursos naturales.

La Ley Federal de Protección al Ambiente fue derogada en marzo de 1988, cuando entró en vigor la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, actualmente vigente, en donde se prevé el ordenamiento ecológico, definido como un proceso de Planeación dirigido a evaluar y programar el uso del suelo y manejo de los recursos naturales en el territorio nacional y las zonas sobre las que la Nación ejerce su jurisdicción y soberanía.

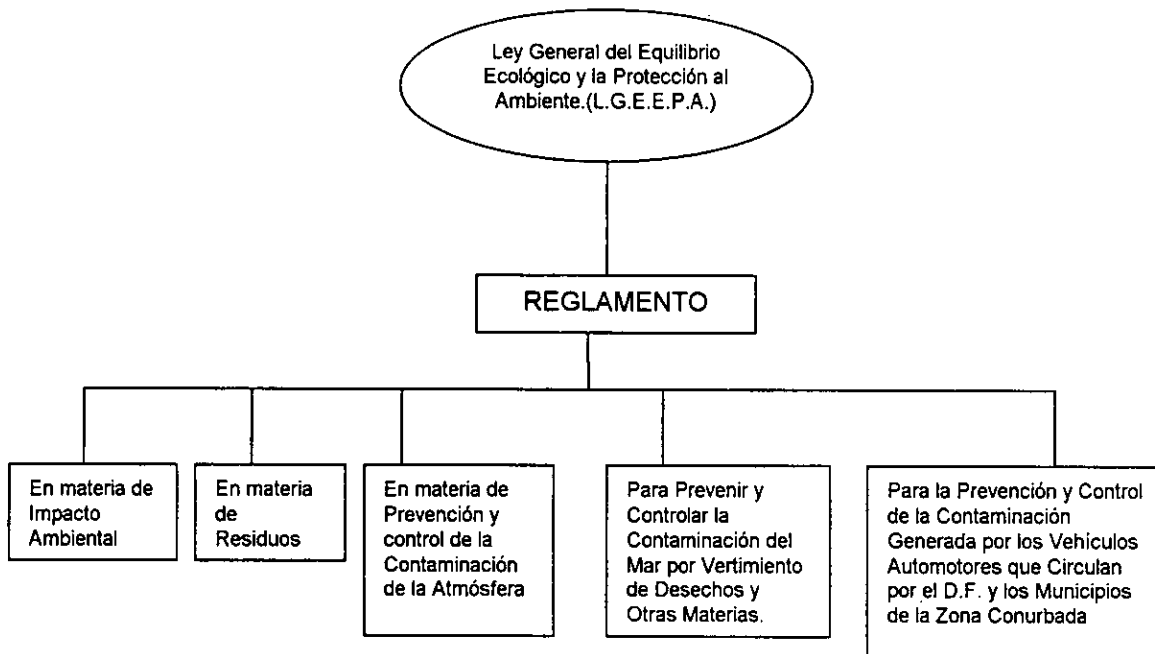
Actualmente dicha ley fue actualizada en su novena edición (Enero de 1997) y establece el ordenamiento ecológico general, a cargo de la federación y el ordenamiento ecológico local, encomendado a los Estados y Municipios de acuerdo a sus respectivas leyes, (ver Figura I.1).

La Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en su título Cuarto, Capítulo 1, referente a la prevención y control de la contaminación, establece que para la protección a la atmósfera se considerarán los siguientes criterios:

- ✓ La calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos.
- ✓ Las emisiones de contaminantes de la atmósfera, sean de fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas, para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico.

Figura I.1

**Reglamentación de Ley General de Equilibrio Ecológico
y la Protección al Ambiente**



Para controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera, la Secretaría tendrá las siguientes facultades:

- I. Expedir las Normas Oficiales Mexicanas que establezcan la calidad ambiental.
- II. Integrar y mantener actualizado el inventario de las fuentes emisoras de contaminantes a la atmósfera .
- III. Expedir las Normas Oficiales Mexicanas que establezcan, los niveles máximos permisibles de emisión de gases y partículas sólidas y líquidas a la atmósfera provenientes de fuentes fijas y móviles.
- IV. Formular y aplicar programas para la reducción de emisión de contaminantes a la atmósfera.

- V. Promover y apoyar técnicamente a los gobiernos locales en la formulación y aplicación de programas de gestión de calidad del aire.
- VI. Requerir a los responsables de la operación de fuentes fijas de jurisdicción federal, el cumplimiento de los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes.
- VII. Expedir las Normas Oficiales Mexicanas para el establecimiento y operación de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire.

I.3 Reglamento de Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera

El Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera en el Capítulo I establece que:

Las emisiones de gases, así como de partículas sólidas a la atmósfera, que se generen por fuentes fijas, no deberán exceder los niveles máximos permisibles de emisión, con base en la determinación de los valores de concentración máxima permisible para el ser humano de contaminantes en el ambiente. Así mismo, y tomando en cuenta la diversidad de tecnología que presentan las fuentes, podrán establecerse diferentes valores al determinar los niveles máximos permisibles de emisión, para un mismo contaminante o para una misma fuente, según se trate de:

- 1.- Fuentes existentes.
- 2.- Nuevas fuentes.
- 3.- Fuentes localizadas en zonas críticas.

Las mediciones de las emisiones contaminantes a la atmósfera, se llevaran a cabo conforme a los procedimientos de muestreo y cuantificación establecidas en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM).

I.4 Normatividad relativa a la prevención y control de emisiones de contaminantes generados por fuentes fijas

Las Normas Oficiales Mexicanas, se definen como :

El conjunto de reglas científicas o tecnológicas emitidas por la Federación que establecen los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en el desarrollo de actividades o uso y destino de bienes, su aplicación y vigilancia corresponderá a las autoridades federales, estatales o municipales, en el ámbito de sus respectivas jurisdicciones territoriales, así como en los términos que se establezcan en su propia legislación.

Las fuentes fijas generan contaminantes, dentro de los que se encuentran, entre otros, las partículas, el monóxido de carbono, el bióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno. Algunos de estos contaminantes reaccionan con otros compuestos, formando otros contaminantes con características toxicológicas más severas al ambiente que aquellos. La emisión de dichos contaminantes produce deterioro a la calidad del aire si rebasa ciertos límites, por lo que se hizo necesario el control de dichas emisiones a través del establecimiento de los niveles máximos permisibles, que aseguren que no se originen alteraciones significativas al ambiente.

Los Niveles Máximos Permisibles, presentados en las Normas Oficiales Mexicanas, se obtuvieron, mediante la copia de las expuestas por diferentes organismos, los cuales las obtuvieron mediante investigaciones que se apegan a las características productivas específicas de su país de origen, de aquí que las expuestas en las Normas Oficiales Mexicanas, sean en general mas altas (menos estrictas),(Ver Cuadro I.2).

Cuadro I.2

Comparación de los límites establecidos en diferentes normas vigentes en otros países

	NOM Méx.	Norma USEPA	Norma OMS	Norma EUROPA
PST pm/m ³	275	260	100-150	70-125
SO ₂ ppm4h	0.13	0.14	0.04-0.06	0.05
CO ppm-8h	13	9	10	8.7
SO ₂ ppm-8h	0.4	0.05 al año	0.1-0.17	0.21
O ₃ ppm-1h	0.11	0.2	0.05-0.1	0.076-0.1

Las Normas Oficiales Mexicanas en materia de Contaminación del Aire son :

NOM-040-ECOL-1993, ESTABLECE LOS NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION A LA ATMÓSFERA DE **PARTÍCULAS SÓLIDAS**, ASÍ COMO LOS REQUISITOS DE CONTROL DE EMISIONES FUGITIVAS, PROVENIENTES DE LAS FUENTES FIJAS DEDICADAS A LA FABRICACIÓN DE CEMENTO.

La descarga de contaminantes a la atmósfera, cuando no sean canalizados a través de ductos o chimeneas se le denomina **emisión fugitiva**.

Los niveles máximos permisibles de emisión de partículas a la atmósfera originadas por las fuentes fijas referidas se presentan en los Cuadros I.3 y I.4 .

Cuadro I.3 Limites máximos permisibles

Proceso de calcinación	Niveles máximos permisibles de partículas kg/h
Menor a 300 ton/hr.	$0.6319 \cdot C^{0.7502}$
Igual o mayor a 300 ton/hr.	0.15°C

Donde:

C = Cantidad de material alimentado a hornos de calcinación en toneladas por hora.

Cuadro I.4 Límites máximos permisibles

Operación	Niveles máximos permisibles de partículas mg/m ³ N ¹
Trituración	80
Molienda de materia prima sin secador integrado	80
Molienda de materias primas, con unidades de secado integrados que utilicen combustibles fósiles	380
Molienda de cemento	80
Enfriamiento del clinker	150

N1.- Volumen a condiciones normales, base seca

NOM-085-ECOL-1994 PARA FUENTES FIJAS QUE UTILIZAN COMBUSTIBLES FÓSILES SÓLIDOS, LÍQUIDOS O GASEOSOS O CUALQUIERA DE SUS COMBINACIONES, QUE ESTABLECE LOS NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIÓN A LA ATMÓSFERA DE HUMOS, PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES, BIÓXIDO DE AZUFRE Y ÓXIDOS DE NITRÓGENO

Los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, óxidos de nitrógeno y bióxido de azufre de los equipos de combustión de las fuentes fijas a que se refiere esta Norma Oficial Mexicana, son los establecidos en la Cuadro I.5.

CUADRO I.5 Límites máximos permisibles (Enero 1998)

Capacidad del equipo de combustión.	Tipo de combustible	Partículas (PST) mg/m ³		SO ₂ Ppm.		NO _x Ppm.	
		ZMVM	RP	ZMVM	RP	ZMVM	RP
MJ/HR							
< 5250	gasóleo	NA	NA	550	2200	NA	NA
	Líquido	NA	NA	550	2200	NA	NA
	Gaseoso	NA	NA	NA	NA	NA	NA
5250-43000	Líquido	75	450	550	2200	190	375
	Gaseoso	NA	NA	NA	NA	190	375
43000-110000	Líquido	60	400	550	2200	110	375
	Gaseoso	NA	NA	NA	NA	110	375
>110000	Sólido	60	350	550	2200	110	375
	Líquido	60	350	550	2200	110	375

NA = no utilizado en México

NOM-039-ECOL-1993, QUE ESTABLECE LOS NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIÓN A LA ATMÓSFERA DE BIÓXIDO Y TRIÓXIDO DE AZUFRE Y NEBLINAS DE ÁCIDO SULFÚRICO, EN PLANTAS PRODUCTORAS DE ÁCIDO SULFÚRICO.

Para efectos de esta norma se consideran zonas críticas por las altas concentraciones de contaminantes de la atmósfera que registran, las siguientes:

Las Zonas Metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, los centros de población del Estado de Veracruz, Estado de Guanajuato, Estados de Hidalgo y de México; Corredor Industrial de Tampico-Madero-Altamira, Estado de Tamaulipas y la zona fronteriza norte.

Los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido y trióxido de azufre a la atmósfera, provenientes de las plantas productoras de ácido sulfúrico existentes son las establecidas en el Cuadro I.6 de esta Norma.

Niveles máximos permisibles para plantas productoras de ácido sulfúrico existentes ubicadas en zonas críticas.

Cuadro I.6 Límites máximos permisibles

Capacidad de la planta (ton/día)	Niveles máximos permisibles (kg de bióxido de azufre/ton de ácido sulfúrico al 100%)	Niveles máximos permisibles (kg de Trióxido de azufre/ton de ácido sulfúrico al 100%)
1 - 500	17.5	28.0
501 - 700	13.0	20.0
701 - 1000	9.0	14.0
> 1000	4.0	7.0

Los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera dentro del límite del predio deben ser inferiores a 0.234 ppm. de SO₂ para las zonas críticas y 0.3 ppm de SO₂ para el resto del país, ambas concentraciones referidas en promedio horario y aplicables para cualquier época del año. Las mediciones para determinar su concentración deben realizarse a partir del límite exterior del predio ocupado por la planta, de conformidad con el método aplicable.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-035-ECOL-1993, QUE ESTABLECE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES EN EL AIRE AMBIENTE Y EL PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN.

Definición

La temperatura y presión barométrica a que se deben corregir los resultados de los muestreos y análisis de un contaminante en el aire. Estas condiciones son: temperatura 298 K (25°C) y presión barométrica 101 kPa (760 mm de Hg).

Estación de monitoreo

Es el conjunto de elementos técnicos diseñados para medir la concentración de contaminantes en el aire en forma simultánea, con el fin de evaluar la calidad del aire en una área determinada.

MEDICIÓN DE PST

El método de referencia, permite medir la concentración de **partículas suspendidas totales** en el aire ambiente, por medio de un muestreador adecuadamente localizado, que succiona a través de un filtro una cantidad determinada de aire ambiente hacia el interior de una caseta o coraza de protección, durante un período de muestreo de 24 hrs. La velocidad de flujo del aire ambiente y la geometría del muestreador son tales que favorecen la recolección de partículas hasta de 50 micrómetros (μm) de diámetro aerodinámico, dependiendo de la velocidad del viento y su dirección. Los filtros usados deben tener una eficiencia de recolección mínima del 99 % para partículas de 0.3 μm .

En este método, el filtro se pesa en el laboratorio bajo condiciones de humedad y temperatura controladas, antes y después de su uso, para determinar su ganancia neta de peso (masa). El volumen total de aire muestreado, corregido a las condiciones de referencia, se determina a partir del flujo de aire ambiente medido y del tiempo de muestreo. La concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente se calcula dividiendo la masa de las partículas recolectadas entre el volumen de aire muestreado y se expresa en microgramos por metro cúbico patrón ($\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{ptn}}$), corregidos a las condiciones de referencia.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-036-ECOL-1993, QUE ESTABLECE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE OZONO EN EL AIRE AMBIENTE Y LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN.

El método para determinar la concentración de ozono en el aire ambiente, es el de luminiscencia química. El método se basa en la capacidad que tiene el ozono de emitir luz al reaccionar con etileno.

En este método se hace entrar simultáneamente aire y etileno a la cámara de mezclado del analizador. Ahí, el ozono presente en el aire reacciona con el etileno emitiendo una luz, que se detecta a través de un tubo fotomultiplicador. La fotocorriente resultante se amplifica y puede leerse directamente o mostrarse en un registrador.

El ozono se combina con el etileno para formar una molécula de ozónido. Posteriormente el ozónido se disocia en un ácido orgánico (ácido fórmico) y un formaldehído activado. El formaldehído activado disipa su exceso de energía liberando fotones.

La celda de reacción de la cámara de mezclado está aislada de la luz, de tal manera que se asegure que sólo la luz resultante de la reacción etileno-ozono sea registrada por el tubo fotomultiplicador. El diseño de la celda es tal, que la reacción se lleva a cabo muy cerca de la ventana, por lo que se puede decir que la totalidad de la luz resultante incide en el tubo fotomultiplicador.

La ventana es una pieza de flexiglas transparente que sella un extremo de la celda de reacción, permitiendo así que la luz sea transmitida al detector.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-034-ECOL-1993, QUE ESTABLECE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO EN EL AIRE AMBIENTE Y LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN.

Medición de CO₂

El método de referencia para determinar la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente, es el de absorción infrarroja por medio de un fotómetro no dispersivo.

El método se basa en la capacidad que tiene el monóxido de carbono para absorber la energía de determinadas longitudes de onda, que consiste en medir la radiación infrarroja absorbida por el monóxido de carbono mediante un fotómetro no dispersivo. En este método se hace pasar un haz de energía infrarroja a través de una celdilla que contiene la muestra de aire por analizar, midiéndose la energía infrarroja absorbida por el monóxido de carbono presente en esa muestra de aire por medio del fotómetro.

La energía luminosa emitida por la reacción ozono-etileno es convertida a una señal eléctrica por el tubo fotomultiplicador, amplificada posteriormente y utilizada para exteriorizar la lectura de la concentración.

Para la aplicación del método se requiere de un analizador para ozono que maneje la técnica de luminiscencia química.

En el Cuadro I.7 se presenta un resumen de las normas dictadas por la Secretaria de Salubridad y Asistencia en materia de límites permisibles de concentración de contaminantes.

Cuadro I.7

Resumen de las Normas SSA

NORMA	Título	ESPECIFICACION
NOM-020-SSA1-1993	O _p	La concentración de ozono, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el limite máximo normado de 0.11 ppm, o lo que es equivalente a 216 µgr/m ³ , en una hora, una vez al año, en un periodo de tres años, para protección a la salud de la población susceptible
NOM-021-SSA1-1993	CO	La concentración de monóxido de carbono, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el valor permisible de 11.00 ppm o lo que es equivalente a 12,595 µgr/m ³ en promedio móvil de ocho horas una vez al año, como protección a la salud de la población susceptible.
NOM-022-SSA1-1993	SO ₂	La concentración de bióxido de azufre como contaminante atmosférico no debe rebasar el limite máximo normado de 0.13 ppm o lo que es equivalente a 341 µgr/m ³ , en 24 horas una vez al año y 0.03 ppm (79 µgr/m ³) en una media aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible.
NOM-023-SSA1-1993	NO ₂	La concentración de bióxido de nitrógeno, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el limite máximo normado de 0.21 ppm o lo que es equivalente a 395 µgr/m ³ , en una hora una vez al año, como protección a la salud de la población susceptible.
NOM-024-SSA1-1993	PST	La concentración de partículas suspendidas totales como contaminante atmosférico, no debe rebasar el limite máximo permisible de 260 µgr/m ³ , en 24 horas, en un periodo de un año y 75 µgr/m ³ en una media aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible.
NOM-025-SSA1-1993	PARTICULAS < 10 MICRAS	La concentración de partículas menores a 10 micras, como contaminantes atmosféricos, no debe rebasar el limite permisible de 150 µgr/m ³ , en 24 horas una vez al año y 50 µgr/m ³ en una media aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible

CAPITULO II

II DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS PRINCIPALES DISPOSITIVOS DE CONTROL DE PARTÍCULAS

II.1 Clasificación de los dispositivos de control de partículas

La primera forma ampliamente reconocida de contaminación del aire fue el humo, el cual está formado por partículas finas de carbono que se originan de la ignición incompleta de combustibles, y ceniza inorgánico que procede de la materia no combustible que se encuentra dentro del combustible. Aún las emisiones muy espesas de humo pueden representar concentraciones relativamente bajas de 2 o 3 g/m³. Los reglamentos para el aire limpio en la mayoría de los países requieren una reducción en la concentración de humo a 0.1 g/m³ o aun menos, para lograr tal reducción es necesario utilizar equipo de remoción de partículas.

En términos más generales, el control de partículas contaminantes del aire implica pasar la corriente de gas que contiene las partículas a través de una cámara y permitir que una fuerza actúe sobre las partículas para sacarlas de la corriente de gas. El Cuadro II.1 muestra una clasificación general de los dispositivos de control de partículas.

Cuadro II.1
Clasificación General de los Dispositivos de control de Partículas

DISPOSITIVO	PRINCIPIO UTILIZADO
Ciclones	El gas entrante se mueve circularmente, aprovechando la fuerza centrífuga del movimiento
Filtros de bolsa	Las partículas se impactan o se atraen electrostáticamente al pasar el gas por el material filtrante
Colectores húmedos	Con la ayuda del agua, se concentran las partículas con las gotas de agua, por lo que caen por gravedad.
Precipitadores Electrostáticos	Una partícula con carga eléctrica repele una placa de carga similar y es atraída por una carga opuesta, por lo que abandona la corriente de gas

Lo mejor en el futuro, para la remoción de partículas será la combinación de una serie de fuerzas, (Mecánica, Eléctrica, Magnética). El Cuadro II.2 muestra un resumen de los métodos de control de procesos industriales

Cuadro II.2
Métodos de control de procesos industriales

Industria	Partículas	Método de Control
Hierro	Óxido de hierro, polvo, humo	Ciclones, filtros de bolsas, precipitadores electrostáticos, colectores húmedos
Acero	Oxido de hierro, humo, polvo aceitoso	Lavadores, colectores centrífugos secos
Metalurgia	Humo, vapores metálicos	Precipitadores electrostáticos, filtros de tela
Petróleo	Polvo del catalizador, ceniza de los lodos	Ciclones, precipitadores electrostáticos, lavadores, filtros de bolsas
Cemento	Polvos de procesos y alcalinos	Filtros de bolsas, precipitadores electrostáticos, Colectores mecánicos
Papel	Polvos de origen químico	Precipitadores electrostáticos, colectores húmedos
H ₂ SO ₄	Neblina ácida, polvos	Precipitadores electrostáticos,
Coque	Polvos de carbón y de coque, alquitranes del carbón	Diseño cuidadoso, operación y mantenimiento de ciclones
Vidrio	Neblina ácida, óxidos alcalinos, polvo, Aerosoles	Filtros de bolsa, incineradores

II.2 Principales parámetros para el diseño de dispositivos de control de partículas.

El método elegido para la separación de partículas depende de varios factores que podemos agrupar de acuerdo a su naturaleza (Ver Cuadro II.3)

Cuadro II.3 Parámetros de Diseño

ELEMENTOS	PARÁMETROS :
NATURALEZA DE LA FUENTE	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Descarga: <ul style="list-style-type: none"> ◦ continua ◦ discontinua <input type="checkbox"/> Temperatura de entrada de gases al proceso <input type="checkbox"/> Temperatura de salida del proceso <input type="checkbox"/> Procesos y reacciones dentro de la fuente fija <input type="checkbox"/> Cantidad descargada
PARTÍCULAS	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Dimensiones y forma <input type="checkbox"/> Densidad <input type="checkbox"/> Estado (sólido/ liquido) <input type="checkbox"/> Composición química <input type="checkbox"/> Conductividad eléctrica
EQUIPO DE REMOCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Tamaño, ubicación y dimensiones <input type="checkbox"/> Eficiencia del equipo <input type="checkbox"/> Aspectos constructivos <input type="checkbox"/> Principios de diseño <input type="checkbox"/> Aspectos de mantenimiento <input type="checkbox"/> Durabilidad <input type="checkbox"/> Localización
GAS TRANSPORTADOR	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Temperatura <input type="checkbox"/> Conductividad eléctrica <input type="checkbox"/> Composición química

PARÁMETROS ECONÓMICOS

Es necesario considerar dichos parámetros para obtener relaciones Beneficio-Costo adecuadas. En principio es necesario observar que para alcanzar el índice de calidad del aire deseado intervienen las siguientes variables:

- Limpieza de los gases (utiliza equipos de remoción).
- Reubicación de la fuente.
- Sustitución del combustible o de los materiales que intervienen en el proceso de producción.
- Cambios en el proceso.
- Mejorar la práctica operatoria.
- Clausura de la fuente (en caso necesario).
- Dispersión de los contaminantes.

Se debe cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas establecidas, por lo que aspectos como: Inversión a futuro, costo de adquisición de equipo, costo de operación, rentabilidad de la inversión y fechas de cumplimiento son aspectos que se deben tomar en cuenta .

Los parámetros económicos que se deben considerar para la adquisición de un dispositivo de control de contaminantes atmosféricos generados por fuentes fijas son :

- ◇ Costos de funcionamiento anual
- ◇ Servicios de:
 - Combustible
 - Electricidad
 - Agua
 - Vapor de agua
 - Aire a presión
 - Productos químicos
- ◇ Mano de obra y supervisión
- ◇ Mantenimiento

Para poder instalar o construir los dispositivos de control de contaminantes es necesario considerar parámetros que nos indican la inversión inicial que se deberá hacer, de tal manera que el dispositivo funcione adecuadamente, de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

- ◊ Terreno \$ /hectárea
- ◊ Desarrollo del local
- ◊ Costos del equipo y del material
- ◊ Obra de construcción
 - Instalación eléctrica
 - Tuberías
 - Concreto armado
 - Estructura
 - Pintura
 - Aislamiento
 - Instalación del equipo
 - Edificación del control

SELECCIÓN DEL EQUIPO PARA ELIMINAR PARTÍCULAS:

Para empezar el diseño de los diferentes dispositivos de control de partículas, consiste en el llenado de una encuesta, con el fin de recabar la información preliminar, que permita tener una primera aproximación sobre el equipo que se necesita de acuerdo con las necesidades particulares de cada empresa.

Las preguntas de la encuesta se pueden agrupar en tres grupos :

- **Características generales del proceso de producción** – tienen como objetivo el conocer la cantidad de contaminantes que se emiten a la atmósfera, así como sus características.
- **Aspectos de la empresa**- tienen como objetivo el establecer las condiciones en que trabajará el equipo que se vaya instalar, para poder así, establecer el programa de mantenimiento necesario.
- **Características del equipo deseado**- Una vez conocido el dispositivo capaz de controlar los contaminantes atmosféricos, este se puede fabricar en diferentes tamaños y materiales.

En el Cuadro II.4 se muestra el diseño típico de una encuesta preliminar encaminada a conocer las características de una fuente fija emisora de partículas

Cuadro II.4
Encuesta preliminar

PASO DE LA ENCUESTA	OPCIONES
1 Fábrica nueva o en servicio	
2. Tipo de fábrica y de procesos	* Origen del gas y polvo * Número de unidades procesadas
4. Razones para limpiar el gas:	* Control de contaminación * Recuperación de productos * Uso para procesos subsiguientes Protección de : Equipo Procesos
5. Describir los sistemas de control, enfriadores de gas o acondicionadores	
6. Situación geográfica y altitud de la planta	* Esquema del espacio disponible. si es factor limitante.
7. Electricidad Volts (Hz)	
8 Gas.	* Min. / Máx. / Diseño
9. Polvo.	* gr/m ³ aire entrada * Tamaño partícula, * % en peso
10. Eficiencia exigida.	
Reglamentación de contaminación del aire Aplicable	

(CONTINUACIÓN Cuadro II.4)

PASO DE LA ENCUESTA	OPCIONES
11. Especificaciones del diseño:	<ul style="list-style-type: none"> * Temperatura * Presión * Efecto del viento * Efecto de la nieve * Capacidad mínima tolva (hrs)
12. Características especiales del polvo	<ul style="list-style-type: none"> * Explosivo * Difícil de eliminar * Combustible * Se acumula en la superficie metálica
13. Datos diversos sobre el proceso Ciclo de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> * Intervalos entre reparaciones * Puede un solo colector servir para eliminar múltiples fuentes de contaminación
14. ¿Existe información de haber tenido un equipo de control de contaminación semejante?	<ul style="list-style-type: none"> * En caso afirmativo infórmese
15. Varios	<ul style="list-style-type: none"> * Ciclo de funcionamiento * Intervalo entre las principales reparaciones * Puede un solo colector servir para las múltiples fuentes de emisiones
16. ¿Cómo prefiere que se recoja el polvo?	<p>Seco Húmedo</p>

(CONTINUACION Cuadro II.4)

PASO DE LA ENCUESTA	OPCIONES
17. Materiales de construcción adecuados	<ul style="list-style-type: none"> * Acero blando, * Acero inoxidable * Forrado de hule * Policloruro de vinilo * FRP
18. Agua de lavado	<ul style="list-style-type: none"> * Origen: <ul style="list-style-type: none"> - lago - municipal - río, mar - pozo * Abastecimiento: <ul style="list-style-type: none"> - Ilimitado - Limitaciones - Estacionales. (litros/min.) - Costo por millón de litros - Presión - Problemas químicos - Dureza - Corrosiva - Pureza - Partes por millón de sedimento - Naturaleza del sedimento
<ul style="list-style-type: none"> ▫ Compañía ▫ Fecha ▫ Dirección ▫ Localización del proyecto ▫ Nombre del solicitante 	

II.3 CICLONES

II.3.1 Aspectos Generales

Los separadores ciclónicos son dispositivos purificadores, 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, cámaras tubulares, en paralelo o en serie. 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. Existen dos clases principales de separadores ciclónicos:

- ◊ Ciclones de paletas axiales
- ◊ Ciclones de involutas.

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 la Figura II.1 se muestra un esquema de un ciclón típico.

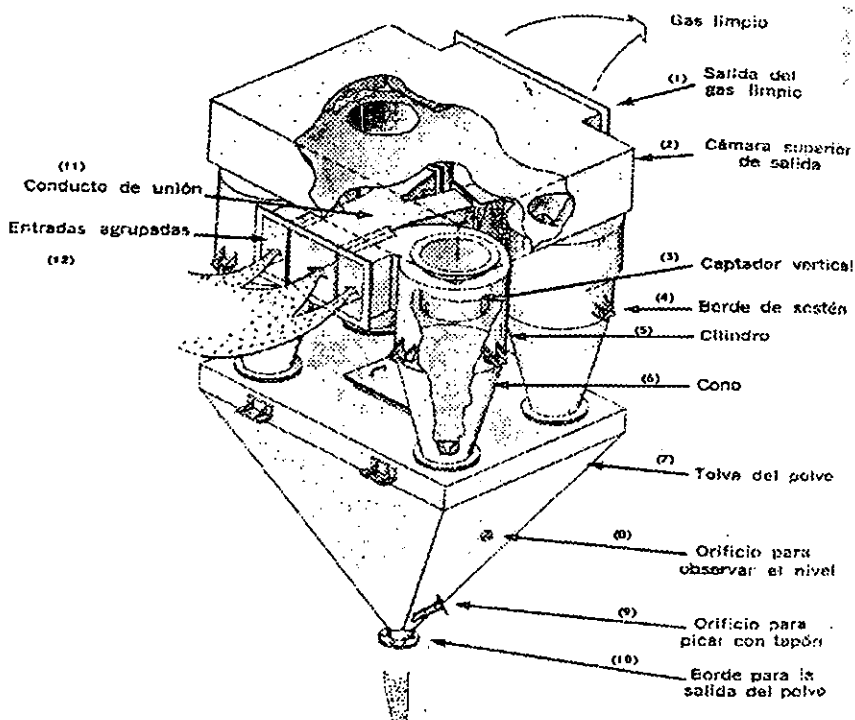


Figura II.1 Ciclón típico

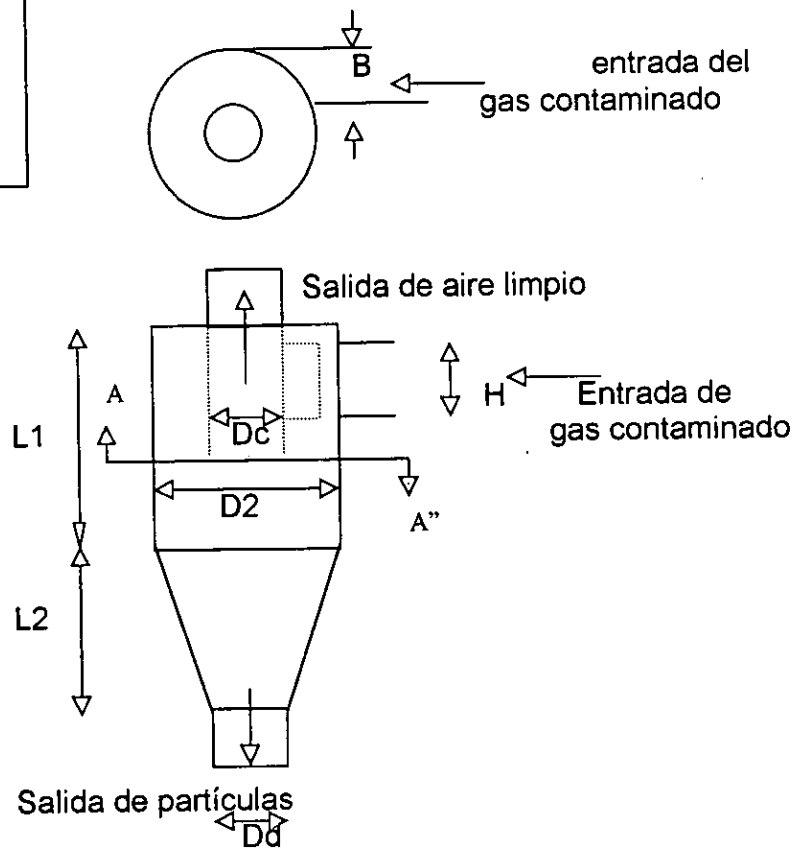
Las partes principales que conforman un ciclón son :

No.	Componente	Función
1	Salida del gas limpio	
2	Cámara superior de salida	
3	Captador vertical	
4	Borde de sostén	Permite quitar los captadores verticales para su limpieza
5	Cilindro	
6	Cono	
7	Tolva del polvo	
8	Orificio para observar el nivel	Permite Observar el nivel de partículas, para decidir cuando limpiar la tolva
9	Orificio para picar con tapón	Evita que la salida de la tolva se tape por exceso de partículas o presencia de humedad
10	Borde para la salida del polvo	
11	Conducto de unión	Une las entradas de varios cilindros, para distribuir uniformemente el gas contaminado
12	Entradas agrupadas	

En el simple separador ciclónico, se obtiene el movimiento circular 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 grados. En la Figura II.2 se muestra un corte de perfil de un ciclón,

* por lo general B y H que son el largo y la altura respectivamente del canal de acceso del gas contaminado son de la misma dimensión

Vista en Planta (corte A-A")



Vista en perfil de un ciclón típico

Figura II.2

La operación depende de la inercia de las partículas a moverse en una línea recta cuando se cambia la dirección de la corriente de gas. La fuerza centrífuga debida a una alta tasa de rotación, lanza las partículas de gas contra las paredes externas del cilindro (5) y del cono (6). Las partículas resbalan por las paredes hasta llegar a la tolva de almacenamiento (7).

El gas gradualmente purificado invierte su espiral descendente y forma una espiral de dimensiones menores. Un tubo alimentador del vórtice (3) que se extiende hacia abajo dentro del cilindro ayuda a dirigir el vórtice interno fuera del dispositivo.

Por lo general, el separador ciclónico se utiliza para eliminar partículas con tamaño de 10 μm o mayor. No obstante, los ciclones convencionales rara vez remueven partículas con una eficiencia mayor del 90%, solo que la partícula tenga un diámetro de 25 μm o mayor.

Existen ciclones de alta eficiencia, que son efectivos hasta con partículas de 5 μm . No importa cuál sea el diseño, la eficiencia de remoción de cualquier ciclón cae rápidamente más allá de un cierto tamaño de la partícula.

Esto se ilustra en la Cuadro II.5, que muestra valores típicos para varios equipos. Un diseño de alto volumen sacrifica la eficiencia para obtener tasas colectoras altas.

Cuadro II.5 Tipos de Ciclones

Tipo de colector	Requerimientos de espacio	Eficiencia	Limitaciones de Temperatura
Ciclón convencional	Grande	50%	Por los materiales de construcción
Ciclón de alta eficiencia	Mediano	80%	Por los materiales de construcción
Ciclones combinados	Pequeño	Combinada	Ninguna

II.3.2 Diseño

El gas cargado de partículas, al entrar al ciclón, gira N_c revoluciones en el vórtice externo principal (cono) antes de entrar al vórtice interno (cilindro) y pasar hacia arriba con dirección a la salida del ciclón. El valor de N_c está dado, como una aproximación, por la fórmula :

$$N_c = (1/H)(L_1 + (L_2/2)) \quad \text{Ec...1}$$

donde :

L_1 = la altura del cilindro Superior principal

L_2 = la altura del cono inferior,

H = la altura de la entrada rectangular a través
de la cual entra el gas contaminado (Ver Figura II.1)

Se supondrá que las partículas están uniformemente distribuidas a la entrada del ciclón. Para que los polvos de cualquier diámetro dado, (d_p), se puedan recoger con 100% de eficiencia, todas las partículas de dicho tamaño que entran en el vórtice interior (cilindro), ($R_i = D_c/2$), del ciclón, deberán ser arrojadas por la fuerza centrífuga contra la pared exterior de radio ($R_o = D_2/2$), antes de que se completen las N_c revoluciones.

Todas las partículas de tamaño (d_p) que entran en algún radio intermedio, (R) (entre R_i y R_o), también se recogerán con 100% de eficiencia. Sólo se recogerán completamente aquellas partículas que se encuentren dentro de la distancia ($R - R^*$). donde (R^*) es el radio mínimo con el que las partículas llegan a la pared exterior durante las N_c revoluciones. Por tanto, la eficiencia colectora fraccionario se puede expresar en general como :

$$\eta = (R_o - R^*) / (R_o - R_i) \quad \text{Ec...2}$$

La magnitud ($R_o - R_i$) es también el ancho W de la entrada rectangular del ciclón. Deduciendo una expresión para ($R_o - R^*$), se puede obtener una ecuación para la eficiencia colectora fraccionaria.

La distancia $(R_o - R^*)$ está directamente relacionada con el producto de la velocidad de la partícula normal al flujo del gas por el tiempo en que el gas permanece en el vórtice exterior. La velocidad normal (radial) se encuentra igualando las fuerzas centrífugas y de arrastre en la dirección radial, y no teniendo en cuenta el efecto de la gravedad. Se supondrá como modelo para el movimiento de la partícula, el flujo de Stokes. Para una partícula esférica, el balance de fuerzas da por resultado la ecuación (3) :

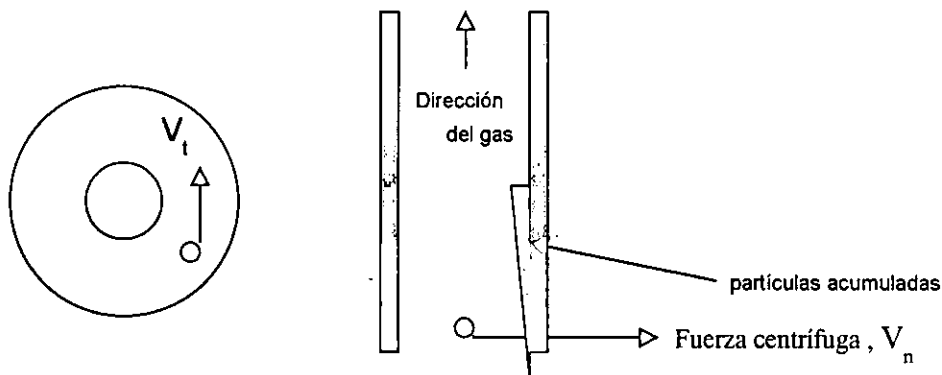


Figura II.3 Comportamiento de la partícula en el vórtice interno

$$3\pi d_p \mu V_n = \rho_p (\pi d_p^3 / 6) (V_t^2 / R)$$

donde :

Ec...3

$$V_n = \rho_p d_p^2 V_t^2 / (18 \mu R)$$

donde :

ρ_p = Densidad de la partícula (kg/m^3)

V_n = Velocidad Normal (m/s)

V_t = Velocidad Tangencial (m/s)

μ = Viscosidad dinámica del gas ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

Como una suposición simplificadora, se tomará V_t como la velocidad de entrada del gas (V_g), y R como un radio promedio entre R_o y R_i . Además, si V_n es constante para una partícula según se mueve hacia afuera, se tiene entonces que:

$$V_n = (R_o - R^*) / \Delta t$$

Por tanto:

$$R_o - R^* = \frac{\rho_p d_p^2 V_g^2 \Delta t}{(18\mu R)} \quad \text{Ec...4}$$

Pero el tiempo en que una partícula permanece en el vórtice externo está dado también por:

$$\Delta t = 2\pi R N_c / V_g \quad \text{Ec...5}$$

donde N_c , es el número de vueltas o revoluciones efectivas. Sustituyendo (5) en (4):

$$R_o - R^* = \frac{\pi N_c \rho_p d_p^2 V_g}{(9\mu)} \quad \text{Ec...6}$$

La sustitución de esta expresión en la ecuación (2) para la eficiencia colectora fraccionaría, queda :

$$\eta_d = \frac{\pi N_c \rho_p d_p^2 V_g}{(9\mu W)} = \frac{\pi N_c \rho_p d_p^2 Q}{(9\mu H W^2)} \quad \text{Ec...7}$$

donde:

- Q = Tasa de flujo volumétrico (m³/s)
- μ = Viscosidad dinámica del gas (Pa*s)
- W = Ancho de entrada del gas (m)
- N_c = Número de revoluciones efectivas
- H = Altura de la entrada del gas (m)
- ρ_p = Densidad de la partícula (kg/m³)
- v_g = Velocidad de entrada del gas (m/s)

La ecuación (7) establece las variables que influyen en la eficiencia colectora. Sin embargo, esta ecuación presenta una importante deficiencia. Para una geometría y un flujo dados, (η_d) varía proporcionalmente a (d_p), y hay un valor definido de (d_p), más allá del cual la eficiencia es siempre 100%.

No obstante, la experiencia dictamina que la eficiencia fraccionaria aumenta de un modo algo exponencial con el aumento de (dp). Esto es, no existe un pronunciado corte en la curva de eficiencia. Para evitar este problema, varios autores han deducido ecuaciones que relacionan el tamaño de la partícula recogida, que tiene una eficiencia del 50%, con otros parámetros de interés.

Lapple (1951), ha deducido una ecuación empírica para la eficiencia colectora, basándose en la ecuación (7), y en el tamaño de corte de la partícula (dp_{50}), si se hace (η_d) igual a 0.5 la ecuación queda :

$$d_{0.5} = \left(\frac{(9\mu W)}{2\pi N_c \cdot \rho_p V_g} \right)^{0.5} = \left[\frac{(9\mu H W^2)}{2\pi N_c \rho_p Q} \right]^{0.5} \quad \text{Ec..8}$$

$dp_{0.5}$ = diámetro de la partícula para el cual la eficiencia colectora es igual a 50%

- Q = Tasa de flujo volumétrico. (m³/s)
- μ = Viscosidad dinámica del gas (Pa*s)
- W = Ancho de entrada del gas (m)
- N_c = Número de revoluciones efectivas
- H = Altura de la entrada del gas (m)
- ρ_p = Densidad de la partícula (kg/m³)
- v_g = Velocidad de entrada del gas (m/s)

Las unidades de esta ecuación deberán ser internamente coherentes. La Figura II.4 muestra la relación de la eficiencia del ciclón con el tamaño de la partícula de acuerdo con la Ec. 8

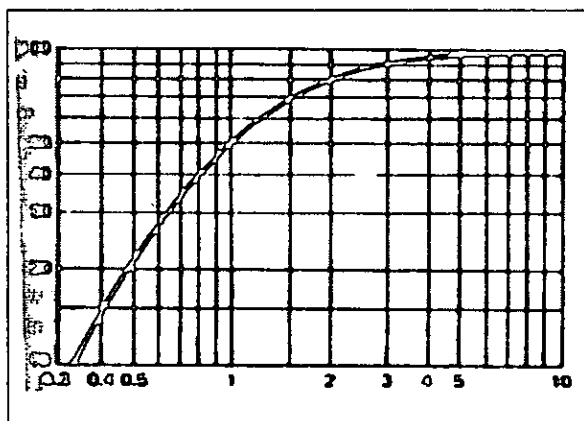


Figura II.4 Relación de la eficiencia del ciclón contra el tamaño de la partícula.

II.3.3 Especificaciones y Construcción

A pesar de que la ecuación propuesta por Lapple (Ec.8) se basa en datos experimentales, algunas de las curvas de los fabricantes de ciclones muestran una eficiencia ligeramente menor que la que aparece en los trabajos de Lapple para valores de (dp/dp_{50}) , mayores de la unidad (Cuadro II.6).

Cuadro II.6 Proporciones normales de los ciclones.

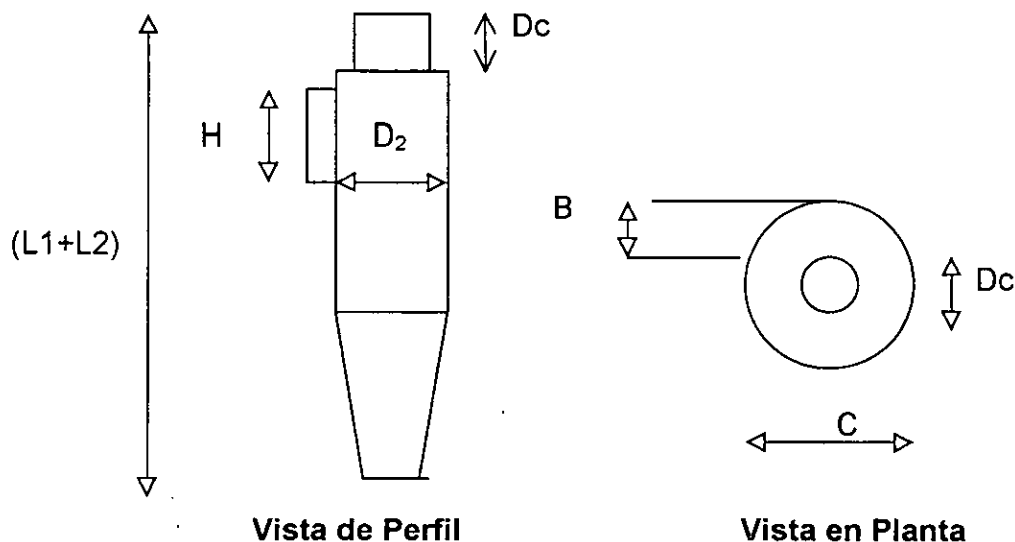
Proporciones normales de los ciclones	Standard	Práctica normal
Longitud del cilindro	L1	$2(D_2)$
Longitud del cono	L2	$2(D_2)$
Altura de la entrada	H	$D_2/2$
Ancho de la entrada	B	$D_2/4$
Diámetro del cilindro de salida	Dc	$D_2/2$
Diámetro de la salida de las partículas	Dd	$D_2/4$

Nota: las proporciones normales se muestran en la **Figura II.2**

En la práctica constructiva de ciclones convencionales se recomiendan ciertas dimensiones dependiendo del gasto total del gas contaminado a tratar. Los Cuadros II.7 y II.8 muestran dichas dimensiones, (las variables que aparecen en los Cuadros son las que se utilizaron en el diseño de los ciclones)

Cuadro II.7 dimensiones generales propuestas por Herding S.A.
Mediciones en (mm)

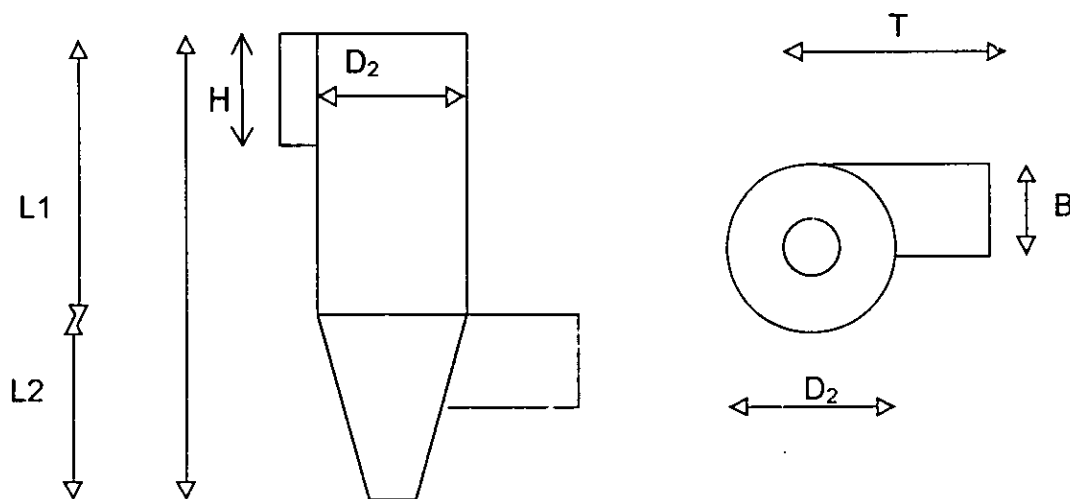
TAMANO	M ³ /Hr	m ³ /seg	H	W	C	(ϕ)D ₂	L1+L2	(L1+L2)-TZL	Dc	L
45	2500	0.69	285	123	280	450	2285	2530	190	180
50	2800	0.78	318	140	300	500	2510	2785	210	200
55	3500	0.97	350	154	330	550	2735	3035	232	220
60	4300	1.19	380	168	350	600	2965	3295	254	240
70	5200	1.44	445	196	400	700	3415	3800	296	280
75	6000	1.67	476	210	430	750	3640	4055	316	300
80	7000	1.94	508	224	450	800	3870	4310	338	320
85	7800	2.17	540	238	480	850	4095	4565	360	340
90	8700	2.42	572	252	500	900	4320	4815	380	360
100	11000	3.06	635	280	550	1000	4770	5320	422	400
105	12000	3.33	666	294	580	1050	5000	5580	444	420
115	13500	3.75	730	320	630	1150	5450	6085	485	460
125	16000	4.44	794	348	680	1250	5905	6595	528	500
130	17500	4.86	826	364	700	1300	6130	6845	550	520
145	22000	6.11	920	405	780	1450	6805	7605	612	580
150	25000	6.94	952	418	800	1500	7035	7860	634	600
160	28000	7.78	1016	446	850	1600	7485	8365	675	620
170	32000	8.89	1080	475	900	1700	7940	8875	718	680
180	35000	9.72	1144	502	950	1800	8390	9380	760	720
195	40000	11.11	1238	544	980	1950	9070	10145	825	780
215	50000	13.89	1366	600	1130	2150	9975	11160	910	860
230	55000	15.28	1460	642	1200	2300	10650	11915	970	920
240	62000	17.22	1524	670	1250	2400	11105	12425	1015	960
255	68000	18.89	1620	712	1330	2550	11785	13190	1080	1020



(L1+L2)-TZL incluye el receptor de partículas

Cuadro II.8 dimensiones generales propuestas por C.V.M. corporation
Mediciones en (mm)

TAMAÑO	D ₂	T	L2	B	L1	(L1+i2)-TZL	H	m3/Hr	m3/seg
32	320	200	100	100	540	1025	75	800	0.22
45	450	250	175	125	740	1300	100	1500	0.42
63	630	350	225	175	900	1800	150	3000	0.83
80	800	450	300	250	1050	2150	175	5000	1.39
90	900	500	375	275	1230	2525	225	6000	1.67
112	1120	600	400	325	1400	2925	275	10000	2.78
130	1300	700	500	375	1550	3275	300	13000	3.61
140	1400	750	550	450	1650	3600	325	16000	4.44
150	1500	800	600	450	1800	3925	375	18000	5.00
170	1700	900	700	500	1900	4200	400	24000	6.67
180	1800	950	750	550	2120	4600	450	27000	7.50
200	2000	1050	825	600	2275	5000	500	34000	9.44
210	2100	1100	875	675	2550	5300	550	38000	10.56
230	2300	1200	950	700	2675	5750	600	46000	12.78
240	2400	1250	1025	750	2725	6000	625	50000	13.89
260	2600	1350	1075	800	2800	6350	675	60000	16.67
280	2800	1450	1225	900	3100	7000	750	70000	19.44
300	3000	1550	1275	950	3250	7350	775	82000	22.78
320	3200	1650	1350	975	3375	7750	825	94000	26.11
340	3400	1750	1425	1025	3525	8150	875	107000	29.72
360	3600	1850	1650	1125	4100	9150	975	121000	33.61



(L1+L2)-TZL incluye el receptor de partículas

II.3.4 Fabricantes

Una vez aplicadas las fórmulas de diseño, se conocen las dimensiones principales del ciclón necesario para controlar las partículas emitidas a la atmósfera, sin embargo dichas dimensiones las debemos ajustar a las dimensiones de ciclones propuestas por los diversos fabricantes de ciclones

Nombre de la Empresa	Aplicaciones	Contacto en México (dirección)
<p>Herding S.A August-Borsig-Str3,D92224 Alemania Tel: 630-0 Fax: 630120</p>	<p>Industria automotriz, química, vidrio, plásticos, comida, metal- mecánica, acero, cemento</p> <ul style="list-style-type: none"> - Hacen los estudios pertinentes para que los ciclones sean los adecuados - Ofrecen mantenimiento en general de instalaciones ya en uso 	<p>Calle Cuauhtémoc #335 – altos Col. Tepepan pueblo C.P. 16020 México D.F. Tel : 6414537 Fax: 6414575</p>
<p>CVM corporation 402 Vandever Avenue Wilmington, Delawere # 19802 Tel : (302)654-7070 Fax: (302)6542772</p>	<p>Especialista en la industria textil, automotriz, metálica y del acero.</p> <ul style="list-style-type: none"> - ofrece una eficiencia entre el 95-99%. - sus estudios de reconocimiento de la calidad del aire sirven de base para varias empresas dedicadas a la colección de partículas. - la construcción de sus equipos se basa en la utilización de aceros y plásticos de alta resistencia. 	
<p>Croll Reynolds Inc. P.O. Box 668,751 Central Avenue Westfield, NJ 07091-0668 Tel (908) 232-4200</p>	<p>En la construcción de ciclones cuenta con tecnología de punta, además de que sus productos son de fácil reparación manual, por lo que no requiere mano de obra especializada</p>	

II.3.5 Ejemplo del diseño de un ciclón

Ejemplo # 1

Se requiere diseñar un ciclón con un ancho de entrada de 12.0 cm y cuatro giros efectivos. La velocidad del gas a la entrada es de 1500.0 cm/s, y la densidad de la partícula es de 1.70 g/cm³. Estímese el tamaño de 50% de eficiencia, si el gas que transporta las partículas es aire y su temperatura es de 350°K.

Solución

El tamaño de la partícula con una eficiencia colectora fraccionaria del 50%, se puede estimar utilizando la ecuación (8). Se supone despreciable la densidad del gas cuando se le compara con la densidad de la partícula. En el Cuadro II.9 se indica la viscosidad del aire dependiendo de su temperatura.

Cuadro II.9 Viscosidad del aire en función de la Temperatura

T°(K)	Viscosidad del aire g/cm-seg
300	.000185
350	.000207
400	.000229
450	.000250

Sustituyendo los valores apropiados en:

$$d_{0.5} = \left(\frac{(9\mu W)}{2\pi N_c \rho_p V_g} \right)^{0.5} = \left[\frac{(9\mu H W^2)}{2\pi N_c \rho_p Q} \right]^{0.5} \quad \text{Ec. 8}$$

Se obtiene :

$$d_{p,50} = \left[\frac{9(12 \text{ cm})(.000207 \text{ gr/cm} - \text{seg})}{(2) \pi(4)(1500 \text{ cm/s})(1.7 \text{ g/cm}^3)} \right]^{0.5}$$

$$\dots\dots\dots = .000592 \text{ cm} = 5.92 \mu\text{m}$$

Este valor es bastante típico de un ciclón, e indica que sólo partículas con diámetros mayores de aproximadamente 10 µm se recogerán de una manera efectiva en este caso.

En resumen, se encuentra que la eficiencia colectora de un ciclón aumenta de acuerdo con la siguiente ecuación :

$$\eta_{col} = \frac{\text{Fza. centrífuga}}{\text{Fza. de arrastre}} = \frac{Vp(\rho_p)(dp^2)}{R(\mu)} \quad \text{Ec...9}$$

ESPECIFICACIONES Y CONSTRUCCIÓN:

Para su construcción se contarán con las siguientes medidas:

Proporciones normales de los ciclones:

$$W = 12 \text{ cm} = .12 \text{ m}$$

$$D_2 = 48 \text{ cm} = .48 \text{ m}$$

Proporciones normales de los ciclones	Standard	Práctica normal	Medidas de construcción (cm)
Longitud del cilindro	L1	2(D ₂)	96
Longitud del cono	L2	2(D ₂)	96
Altura de la entrada	H	D ₂ /2	24
Ancho de la entrada	B	D ₂ /4	12
Diámetro del cilindro de salida	Dc	D ₂ /2	24
Diámetro de la salida de las partículas	Dd	D ₂ /4	12

Nota : Ver La Figura II.5

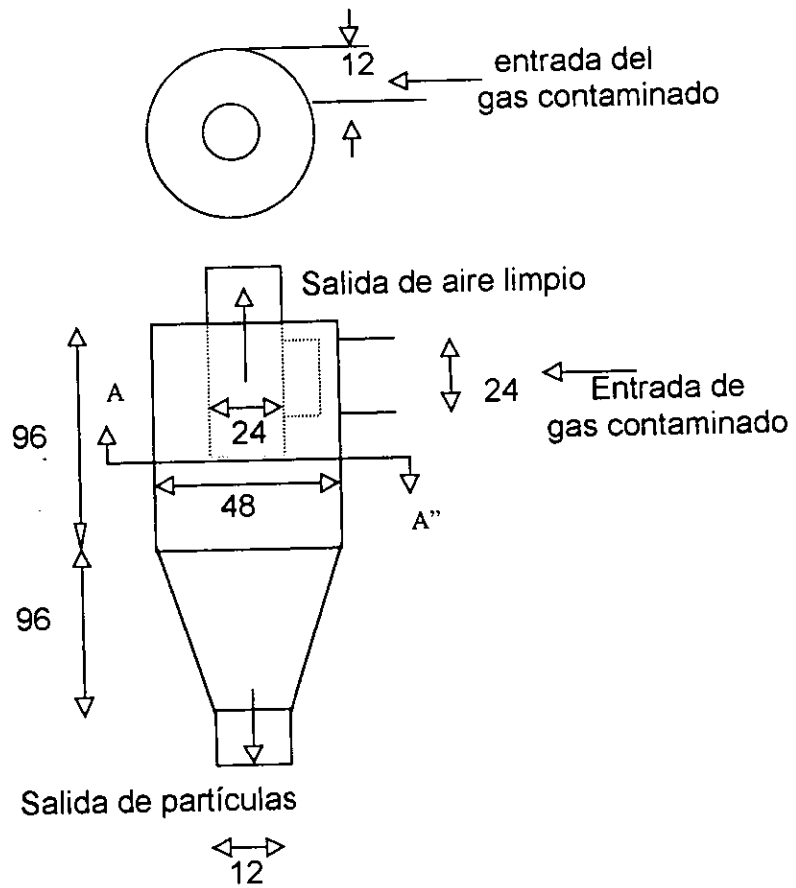


Figura II.5 Dimensiones del ciclón, mediciones en cm.

Ejemplo # 2

Dado el radio de partícula distribuido por una industria dedicada a la producción de cereales, sugerir el ciclón estándar convencional para que la emisión de partículas se considere dentro de rango de 95% de eficiencia. Para esto utilice las consideraciones practicas y materiales de construcción así como especificaciones de la empresa Herding, que distribuye sus productos en México.

Para fines económicos se debe considerar que la instalación del equipo de cualquier modelo necesita de la operación de dos cuadrillas instaladoras provista de:

1 Cuadrilla de colocación y construcción del equipo

2 Cuadrilla de preparación del lugar

dichas cuadrillas cobran por destajo dependiendo del lugar en que se vaya a colocar o construir el ciclón. Precio aproximado : (\$ 50.00/m²).

Características:

$$\mu = 0.0000185 \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (1\text{Pa} = 1 \text{ N/m}^2)$$

$$P_p = 1600 \text{ kg /m}^3$$

$$Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Eficiencia : 95 %

Solución:

De la Figura II.4 encontramos que para una relación :

$$\frac{d}{d^{0.5}} = \frac{10\mu\text{m}}{2.31\mu\text{m}} = 4.31$$

se obtiene una relación de 95%, por lo que sustituyendo en la formula:

$$d_{0.5} = \left[\frac{(9\mu HW^2)}{\theta(p_p)(Q_g)} \right]^{0.5}$$

donde:

$$\theta = \pi * (2 * L_1 + L_2) / H$$

sabiendo que :

$$Dp_{50} = 2.31 \mu m$$

$$B = 0.25(D_2)$$

$$H = 0.5(D_2)$$

D2 = diámetro central del ciclón

$$L1 = 2(D_2)$$

$$L2 = 2(D_2)$$

Sustituyendo, sabiendo que::

$$0.00000231 \text{ m} = \left[\frac{9(18.5 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}) W^2 H}{\left(\frac{\pi(2L_1 + L_2)}{H} \right) (20 \text{ m}^3/\text{seg}) (800 \text{ Kg/m}^3)} \right]^{0.5}$$

y despejando D₂ tenemos

$$0.00000231 \text{ m} = \left[\frac{9(18.5 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}) [0.25(D_2)]^2 [0.5(D_2)]}{\left(\frac{\pi[4(D_2)] + 2(D_2)}{H} \right) (20 \text{ m}^3/\text{seg}) (800 \text{ Kg/m}^3)} \right]^{0.5}$$

despejando obtenemos que :

$$D_2 = 0.85 \text{ m}$$

Por lo tanto, siguiendo las recomendaciones se obtiene un ciclón con las siguientes dimensiones Ver Figura II.6 :

$D_2 = 85.00\text{cm}$
 $D_c = 42.50 \text{ cm}$
 $D_d = 21.25 \text{ cm}$

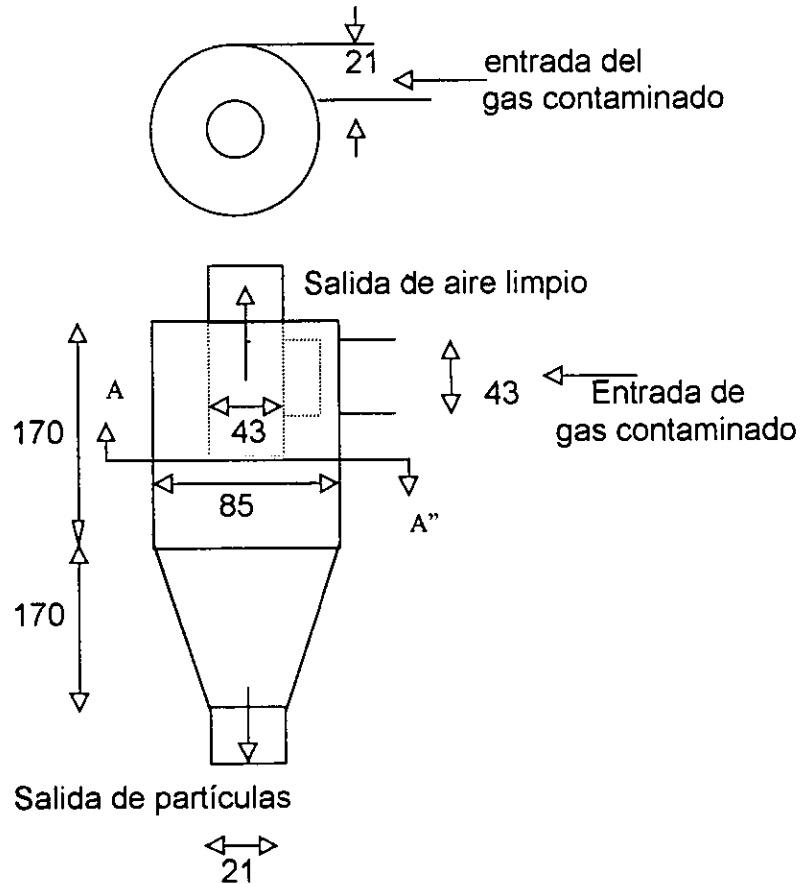


Figura II.6 Dimensiones del ciclón, mediciones en cm.

Para su construcción se necesitarían las siguientes cantidades de acero o lámina forjada. Las especificaciones de construcción indican que el material utilizado debe cumplir como mínimo con las siguientes características :

Espesor mínimo : 0.5 – 0.3 mm
 $F_y = 2580 \text{ kg/cm}^2$

Total de acero :

Area de entrada rectangular: 3.50 m^2

Ciclón cilíndrico: 10.68 m^2

Cono recolector : 3.57 m^2

Caja de disposición final: 0.75 m^2

Soportes metálicos del aparato : (cancelería)

Total = 18.5 m^2

El Costo de mano de obra será de $18.5 \text{ m}^2 * \$ 50.00 = \925.00

II.4 Filtros de Bolsa

II.4.1 Aspectos Generales

La filtración es uno de los métodos más antiguos y de uso más generalizado para la separación de partículas del gas que lo transporta. En general, un filtro es cualquier estructura porosa compuesta de material granular o fibroso que tiende a retener las partículas según pasa el gas que lo arrastra, a través de los espacios vacíos del filtro. (Ver Figura II.7).

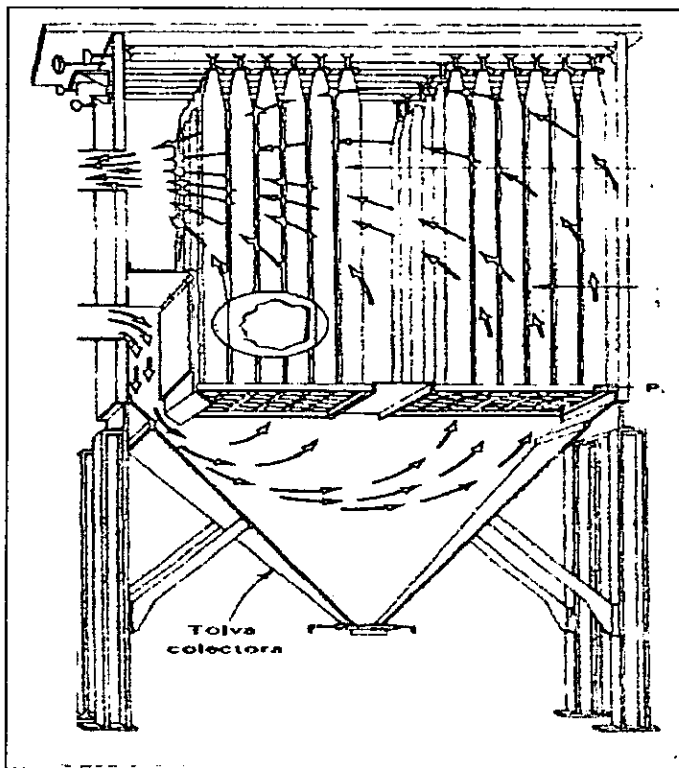


Figura II.7 Esquema de un filtro de bolsa

El filtro se construye con cualquier material compatible con el gas y las partículas, (no reactivo), y se puede disponer en lechos profundos o telas. Los filtros de colchones y lechos profundos tienen grandes espacios vacíos que llegan de 97 a 99% del volumen total. Se utilizan para cargas de polvo muy ligeras y están diseñadas para permanecer en servicio durante largos períodos. Por lo general se limpian en el lugar mismo, periódicamente a intervalos relativamente cortos. Los filtros de tela se forman generalmente dentro de tubos cilíndricos y se cuelgan en hileras múltiples para proporcionar grandes áreas superficiales para el paso del gas. Los filtros de tela tienen eficiencias del 99% o más, cuando colectan partículas de $0.5 \mu\text{m}$, y pueden remover cantidades considerables de partículas de $0.01 \mu\text{m}$. Las cargas típicas de polvo manipuladas oscilan entre 0.1 gr/pie^3 y 10 gr/pie^3 de gas (0.23 a 23 g/m^3).

Las telas tejidas tienen casi siempre relaciones entre el espacio de aire y el área de la tela de 1:1 a 5:1; por tanto, debe haber otro fenómeno distinto de la simple acción de tamiz que sea responsable de la separación inicial de las partículas, los mecanismos importantes de filtración son:

- ◇ Impactación por inercia
- ◇ Intercepción directa
- ◇ Difusión.

La atracción electrostática puede tener un papel con ciertos tipos de polvos. Las partículas mayores de $1 \mu\text{m}$ se colectan principalmente por impactación e intercepción directa, mientras que las partículas entre 0.001 a $1 \mu\text{m}$ se remueven principalmente por difusión y atracción electrostática.

Una de las desventajas de los filtros de tela es la necesidad de limpiarlos con frecuencia a fin de evitar caídas de presión irrazonables, de aquí resulta que el diseño básico de los filtros industriales, se basa, por lo general, en unas condiciones geométricas que se presten a una relativa facilidad de limpieza. No obstante, otra consideración geométrica debe ser la que estipule un área superficial grande por gasto volumétrico del gas contaminado. El inverso de esta relación se conoce como la relación de aire a tela, o la relación de filtración, y los valores óptimos van desde 1 a 8 pies/ min. (0.5 a 4 cm/s). Esta es también la velocidad superficial del gas. Un método básico de ajustarse a estos criterios es un sistema colector basado en una casa de bolsas.

Los cilindros de tela (soportados internamente de alguna manera) con diámetros que oscilan entre 5 y 14 pulgadas, y con longitudes de hasta 40 pies se disponen en hileras verticales. Será necesario utilizar muchas bolsas individuales en una casa de bolsas, cuando sea necesario limpiar grandes volúmenes de gas. Una gran casa de bolsas capaz de remover seis toneladas de polvo y vapores por hora, instalada en una gran fundición automotriz consiste de 16 compartimentos con un total de 4,000 bolsas de dacrón que tienen un diámetro de 7.64 pulgadas y 22.5 pies de largo.

Esto conduce a una inherente desventaja del diseño de las casas de bolsas, a saber, el tamaño total del equipo es grande comparado con otros tipos competitivos de dispositivos de remoción. Por lo general, el gas impuro entra en la bolsa desde abajo y pasa a través de la tela, mientras que las partículas se depositan en el interior de la bolsa. A pesar de que existe una amplia variedad de diseños para las casas de bolsas, en general se pueden clasificar por el método de limpieza y por su operación, que puede ser:

- ◊ Periódica (o intermitente)
- ◊ Automática (continua)

La operación automática continua se requiere cuando no sea deseable o práctico el cierre periódico. (La operación intermitente requiere detener totalmente el proceso a fin de limpiar la tela de los filtros). El gas impuro deja de pasar por el equipo durante el ciclo de limpieza.

La limpieza se efectúa principalmente por:

- ◊ Vibración mecánica o sacudidas
- ◊ Flujo invertido del aire
- ◊ Sistema de impulsos

Vibración mecánica – Proporciona frecuentemente el costo más bajo por tasa de flujo volumétrico. Consiste en desprender manualmente las bolsas para después limpiarlas.

Flujo invertido del aire – En este sistema se corta el flujo de aire contaminado al compartimento, y el aire para la limpieza fluye a través de la bolsa en la dirección opuesta. La economía de la limpieza por flujo inverso, impone el uso de bolsas con 20 pies de alto, (6-7 m).

Sistema de impulsos – Se dirige un corto movimiento hacia abajo, a través de un venturi situado en la parte superior de la bolsa. El impulso pasa rápidamente hacia la parte inferior de la bolsa desprendiendo de la bolsa grandes capas de polvo. Estos grandes trozos de polvo se asientan por gravedad en el fondo de la casa de bolsas. La ventaja de este método es que el tiempo de limpieza es muy corto y solo una fracción de las bolsas se limpia a la vez (Ver Cuadro II.10, para velocidades de operación).

Cuadro II.10 Características de los sistemas de bolsas

Sistema	Velocidades de Filtración (m/min.)	Características de las bolsas
Sacudimiento Mecánico	0.6-1.0	Altura = 2.0-5.0 m
Flujo invertido de aire	2.0-4.0	Altura = 6.0-7.0 m Diámetro = 0.2-0.3 m
Sistema de Impulsos	2.0-5.0	Altura = 5.0-6.0 m Diámetro = 0.2-0.3 m

Se dispone de una variedad de telas. Entre las de uso común se encuentran:

- ◊ Lana
- ◊ Algodón
- ◊ Nylon
- ◊ Fibras de vidrio
- ◊ Poliéster
- ◊ Poliarnidas aromáticas.

La selección de la tela depende de la composición química, temperatura y contenido de humedad del gas, así como de la composición física y química de las partículas. La composición química de la corriente del gas como de las partículas, ejerce un efecto sobre la tasa a la que se desgasta la tela. A pesar de que una tela de algodón o lana sería aceptable para un gas hasta una temperatura del 175° a 200°F (350°K), una fibra de vidrio es más adecuada cuando la temperatura del gas se acerca a los 500° a 550°F (aproximadamente 550°K). Este último intervalo de temperatura es aproximadamente el límite superior actual, a pesar de que continúan las investigaciones para encontrar nuevas fibras, enfatizando en el aumento del límite más allá de 550°F. La ventaja de más altas temperaturas de operación consiste en la reducción de los requerimientos de control térmico. Esto es, se requiere menos preenfriamiento de una corriente de gas caliente antes de que entre al equipo de filtros de tela. Por otra parte, no es en general permisible un enfriamiento excesivo del gas, debido a que las casas de bolsas no operarán por lo general con un gas que se haya enfriado por debajo del punto de rocío. No obstante, los ahorros causados por el menor enfriamiento del gas, queda algo compensado por el aumento en el volumen del gas que pasa por los filtros como resultado del aumento en la temperatura.

II.4.2 Diseño

La teoría de la colección mediante la impactación por inercia sobre los lechos de filtración es muy compleja. En el caso de la filtración por tela, el modelo inicial podría ser el de una esfera móvil que se acerca a un cilindro estacionario. Sin embargo, una vez que se adhiere una capa inicial de polvo retenido, la geometría se hace muy complicada. El polvo retenido así como las fibras de la tela actúan como blancos para la depositación de las partículas adicionales. Es obvio que los impactos cambian espacialmente en forma continua con el tiempo. No obstante, el punto inicial razonable para un modelo de filtración sería considerar la impactación de las esferas sobre los cilindros.

Considérese un gas cargado de polvo que se acerca a una fibra cilíndrica de diámetro d_f . Si se proyecta el área de la sección transversal de la fibra, (por longitud unitaria de la fibra, por ejemplo), corriente arriba en una dirección paralela al flujo, sólo aquellas partículas en el flujo no perturbado, corriente arriba, que están dentro del área proyectada podrán alguna vez impactar directamente sobre el cilindro. Por tanto, una eficiencia de impactación o de choque se define en este caso como la fracción de partículas de un tamaño dado que pasan a través del área proyectada corriente arriba y chocan posteriormente con la superficie colectora del cilindro.

Esta eficiencia no será del 100% ya que algunas de las partículas son transportadas alrededor del cilindro a lo largo de las líneas de flujo del gas, las que divergen alrededor del cilindro (Figura II.8). Nótese que la eficiencia es para un tamaño determinado y puede ser, por tanto, que varíe considerablemente con los tamaños debido a la dependencia de la inercia sobre la masa.

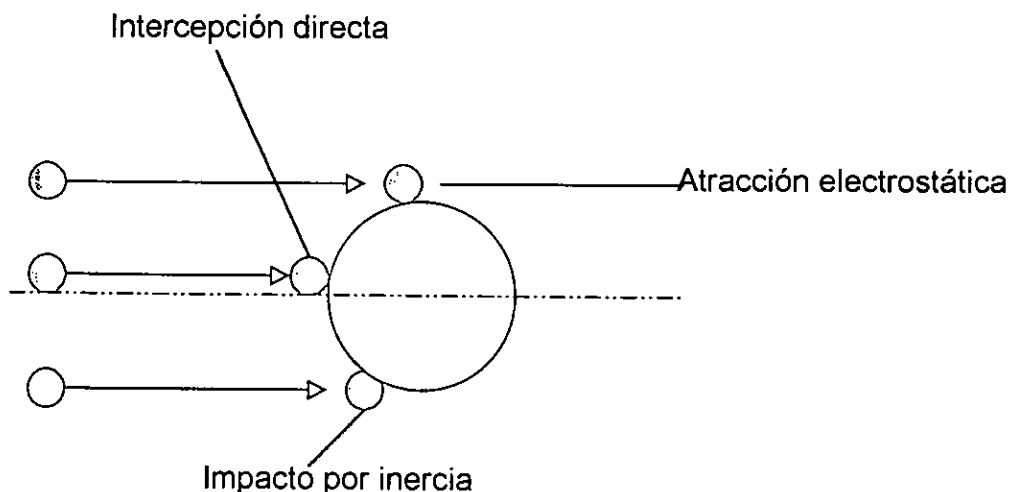


Figura II.8 Formas de Intercepción de las partículas

Para los filtros de Bolsas, la eficiencia del choque es una función del número de impactación o separación, suministrado por la ecuación (10) a saber:

De la Ley de Stokes:

$$Ni = \frac{Vp(dp^2)(\rho) Kc}{18\mu(df)} \quad \text{Ec.10}$$

donde :

Vp = velocidad relativa de las partículas con respecto al gas

dp = diámetro de la partícula

df = diámetro de la fibra de la bolsa

ρ = densidad de la partícula

Kc = factor de corrección de Cunningham

μ = viscosidad dinámica

Ni = número de impactación

Se ha supuesto que la ley de Stokes es válida para el movimiento de la partícula. En la Figura II.9 se muestra una correlación experimental, para objetos cilíndricos, de la eficiencia de impactación o de choque contra el número de impactación. Para un tamaño y la densidad dadas y propiedades de la corriente de gas, esta correlación indica que se alcanzará la más alta eficiencia de choque cuando el filtro esté formado por fibras de diámetro pequeño.

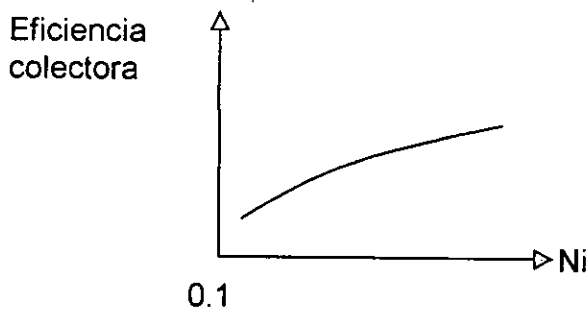


Figura II.9 Relación Eficiencia colectora - (Ni)

Otra importante consideración es la caída de presión a través de los filtros de tela. Según se acumula la "torta" de filtro sobre la tela soportante, se podría esperar que aumentara la eficiencia. No obstante, al mismo tiempo, aumenta también la resistencia al flujo. Para una tela de filtro relativamente limpia, la caída de presión es alrededor de 1/2 pulgada de agua (1.2 mbar) y la eficiencia de remoción es baja.

Para una pérdida de tiro de 2 a 3 pulgadas de agua, después de una suficiente acumulación de la torta, la eficiencia llega al 99%. Cuando la caída de presión se acerca a 5 ó 6 pulgadas de agua, en general es necesario limpiar el filtro de cualquier manera, a fin de reducir la caída de presión a un valor más razonable, de otro modo, se hace excesivo el gasto de energía.

La caída global de presión es la suma de la caída debida a la tela más contribuida por la capa de polvo. Se supone viscoso el flujo a través de la tela y la capa de polvo depositado. Por tanto, la caída de presión tanto para la capa de polvo como para el filtro limpio se puede representar por la ecuación de Darcy, la que establece que:

$$\frac{\Delta p}{x} = \frac{V(\mu)}{K} \quad \text{Ec.11}$$

donde :

K = permeabilidad del polvo o del filtro

V = velocidad superficial del gas

x = profundidad del lecho de partículas o el espesor del filtro.

μ = viscosidad Dinámica del gas Contaminado

Nótese que V en la ecuación de Darcy es la velocidad superficial a través del lecho, esto es, el gasto volumétrico que se acerca al filtro, dividida entre el área de la tela.

La ecuación es en realidad una definición de la permeabilidad, (K), ya que todos los otros términos de la ecuación son parámetros fáciles de determinar. K es una magnitud bastante difícil de predecir sin efectuar mediciones directas, ya que es una función de las propiedades del polvo depositado, tales como la porosidad, el área específica de superficie, la distribución del tamaño de los poros, y la distribución del tamaño de las partículas entre otras. La dimensión del término permeabilidad es igual a la longitud elevada al cuadrado(L²).

La caída total de presión, Δp_o , es igual a la suma de la presión a través de la tela del filtro y a través del depósito de partículas. Se puede escribir, en términos de la ecuación de Darcy, como:

$$\Delta p_o = \Delta p_f + \Delta p_p = \frac{x_f(\mu)V}{K_f} + \frac{x_p(\mu)V}{K_p} \quad \text{Ec.12}$$

Donde los subíndices f y p se refieren a la tela limpia y a la capa de partículas o polvo, respectivamente. La caída de presión de la tela (Δp), debe ser esencialmente constante para un material y polvo dados. Por tanto, la caída total de presión depende primero de la variación de (Δp), según se acumula la capa de polvo sobre la tela limpia. Para condiciones dadas de operación (viscosidad y velocidad superficial del gas) (Δp_p) es primero una función de la permeabilidad del polvo, (K) y del espesor de la capa de polvo (x_p). El espesor de la capa de polvo es, a su vez, una función directa del tiempo de operación (t).

Se puede desarrollar una expresión, con base en los primeros principios, para la variación con el tiempo de (Δp_p) y la caída de presión a través de la capa de polvo. Esto se lleva a cabo fijándose en que la masa de polvo recogida en el tiempo (t), (después de la puesta en marcha), equivale al gasto volumétrico del gas multiplicado por el intervalo y por la masa de polvo en la corriente del gas, por volumen unitario; (L_d). Sin embargo, la masa acumulada equivale también a la densidad de la partícula, (ρ) sobre la superficie del filtro, multiplicada por el volumen de polvo recolectado en el tiempo (t). Igualando estas dos magnitudes, se puede escribir la siguiente expresión:

$$\text{masa colectada} = (VA)(t)(L_d) = \rho(A(x)) \quad \text{Ec. 13}$$

donde:

A = área de la sección transversal del filtro

V = velocidad del gas normal al filtro

L_d = carga de polvo

ρ = densidad de la torta del filtro

x = espesor del filtro

T = tiempo de recolección

La ecuación (13) demuestra que :

$$x = \frac{V(L_d)(t)}{\rho}$$

Por tanto, la caída de presión a través del polvo recién depositado resulta ser:

$$\Delta p_p = \frac{x \mu V}{K_p} = \frac{V L_d(t) \mu V}{(\rho) K_p} = \frac{V^2 L_d(t) \mu}{K_p (\rho)} \quad \text{Ec.14}$$

donde:

μ = viscosidad dinámica del gas [lb-pie*hr]

V = velocidad del gas [pie/min.]

L_d = carga de polvo [gr/pie³]

t = tiempo [hrs.]

L_d = carga de polvo

Δp_p = caída de presión a través del polvo depositado [lbm/pulg²]

ρ = densidad de la torta de filtro [g/cm³]

K_p = permeabilidad de la capa de polvo [pie²]

Como p_g , p_c , y K_p son valores únicos de la corriente de gas y de las partículas dadas, se les agrupa en un parámetro de resistencia (R_p), de donde resulta por definición que:

$$R_p = \frac{\mu}{\rho(K_p)} \quad \text{Ec.15}$$

De aquí resulta que la ecuación (14) se puede simplificar para que tome la forma:

$$\Delta p_p = R_p (V^2) (L_d)(t) \quad \text{Ec.16}$$

Se supone que L_d y V no varían durante el ciclo de filtración en esta deducción. Para las características dadas del gas y la permeabilidad de la torta de filtro, se ve que la caída de presión a través de las partículas depositadas varía linealmente con la carga de polvo en la corriente del gas, y también con el tiempo. También varía con el cuadrado de la velocidad superficial del gas, con base en esta teoría.

II.4.3 Especificaciones y construcción

Se debe conocer en primera instancia las características de los diferentes materiales que pueden ser utilizados como elemento filtrante (Cuadros II.11, II.12, II.13):

Cuadro II.11 Características de los filtros

Agentes filtrantes	Nombre común	Material	Color	Temp. de operación	Filtración	Resistencia a la humedad
Acrylico (Copolymer)	Acrílico	85 % acrylonitrile	Crema	248°F	Bueno	Excelente
Acrylico (Homopolymer)	Dralon	100% acrylonitrile	Crema	284°F	Bueno	Excelente
Aramid	Nomex Conex	Aramid	Crema	400°F	Excelente	Excelente
Algodón	Algodón	Algodón	Crema	180°F	Bueno	Excelente
Fibra de vidrio	Fiberglass	Silica	Gris	500°F	Pobre	Excelente
Nylon	Nylon 6	Polyamide	Blanco	200°F	Bueno	Pobre
Poliester	Poliester	Ester of dehydric alcohol	Blanco	275°F	Excelente	Excelente
Polypropylene	Merkalon	85% Olefin	Blanco	170°F	Bueno	Pobre
Rayón	Rayón	Resina	Café	500°F	Falla	Excelente
Teflón	Teflón	PTFE	Café	375°F	Excelente	Excelente
Lana	Lana	Lana	Azul	200°F	Bueno	Pobre

Cuadro II.12 Especificaciones de los Agentes Filtrantes

Agentes filtrantes	Humedad caliente	Solventes	Agentes oxidantes	Acidos orgánicos
Acrílico	Excelente	Falla	Falla	Bueno
Aramid	Excelente	Bueno	Bueno	Pobre
Algodón	Excelente	Bueno	Bueno	Pobre
Fibra de vidrio	Excelente	Excelente	Bueno	Bueno
Nylon	Bueno	Bueno	Pobre	Excelente
P84	Excelente	Excelente	Falla	Bueno
Poliéster	Pobre	Falla	Falla	Pobre
Polypropyleno	Pobre	Excelente	Excelente	Excelente
Rayon	Excelente	Excelente	Falla	Excelente
Teflón	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Lana	Pobre	Bueno	Pobre	Pobre

Cuadro II.12(a) Especificaciones de los agentes filtrantes

Agentes Filtrantes	Abrasión	Alkalis	Hidrólisis	Acidos minerales
Acrílico (Copolymer)	Bueno	Pobre	Bueno	Bueno
Acrílico	Bueno	Pobre	Bueno	Bueno
Aramid	Falla	Falla	Falla	Pobre
Algodón	Bueno	Excelente	Pobre	Pobre
Fibra de vidrio	Pobre	Pobre	Excelente	Bueno
Nylon	Excelente	Bueno	Falla	Pobre
P84	Falla	Falla	Falla	Pobre
Poliéster	Excelente	Bueno	Pobre	Falla
Polypropyleno	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Rayon	Excelente	Excelente	Falla	Excelente
Teflón	Falla	Excelente	Excelente	Excelente
Lana	Bueno	Pobre	Pobre	Excelente

Cuadro II.13 Características de operación de los agentes filtrantes

Propiedades	Acrílico (Copolymer)	Acrílico (Homopolymer)	Aramid	Algodón	Nylon
Temperatura recomendable de operación (°F).	248°F	284°F	400°F	180°F	200°F
Temperatura recomendable de operación en condiciones húmedas (°F).	230°F	260°F	350°F	180°F	200°F
Temperatura máxima de operación .	248°F	284°F	450°F	200°F	250°F
Densidad Especifica (g/cm ³)	1.15	1.15	1.38	1.50	1.14
Humedad relativa recuperable en %	1.00	1.00	4.50	8.50	4 – 4.5
Indice de Tenacidad	20	35	33		60
Soporta la combustión ?	No	Si	No	Si	Si
Resistencia al ataque biológico	Muy Bueno	Muy Bueno	No	No	No

Cuadro II.13 (a) Características de operación de los agentes filtrantes

Propiedades	Poliester	Polypropylene	Ryton	Teflon	Lana	Fibra de Vidrio
Temperatura recomendable de operación (°F)	270°F	200°F	375°F	500°F	200°F	500°F
Temperatura recomendable de operación en condiciones húmedas (°F)	200°F	200°F	375°F	500°F	190°F	500°F
Temperatura máxima de operación	300°F	225°F	425°F	550°F	230°F	550°F
Densidad Especifica (g/cm ³)	1.38	0.91	1.37	2.30	1.31	2.54
Humedad relativa recuperable en %	0.40	0.10	0.60	3.00	15.00	1.00
Indice de Tenacidad	60	50	35	18		
¿Soporta la combustión ?	Si	Si	No	No	No	No
Resistencia al ataque biológico	No	Excelente	Excelente	No	No	No

Consejos constructivos para la colocación de los filtros de bolsa.

Al adquirir el filtro de bolsa indicado, se debe colocar temporalmente sobre tarimas de madera que amortigüen el peso de dicho equipo.

Se debe construir un firme de concreto con las siguientes características:

- $f'c \text{ min} = 150 \text{ kg/cm}^2$
- Espesor mínimo = 10 cm.
- El firme debe sobresalir 40 cm. Del ancho total del equipo

Una vez preparado el firme se deben construir "muertos" para anclar el equipo, el cual debe estar colocado en un lugar que presente las siguientes características:

- ◊ Toma de corriente al alcance del equipo.
- ◊ Fácil manejo y rehabilitación de los ductos alimentadores de gas contaminado.
- ◊ Lugar cercano a una vía de acceso, para que los residuos sean fácilmente cargados en camiones.

Como el polvo recogido en una tela de filtro actúa como el medio filtrante, la eliminación de la capa de polvo durante la limpieza afecta ciertamente la eficiencia colectora. En el estado de limpieza la eficiencia está por debajo de 90% para tamaños entre 0.1 y 0.5 μm , pero se mantenía arriba del 98% para partículas mayores de 1 μm . En general, los filtros de tela tendrán eficiencias colectoras fraccionarlas de 90% y mayores después de varios ciclos de limpieza, y la eficiencia total excederá usualmente un 99%.

Las ventajas de los filtros de tela incluyen:

- Amplia eficiencia colectora sobre un intervalo amplio de tamaños de partículas.
- Extrema flexibilidad de diseño, proporcionada por la disponibilidad de varios métodos de limpieza y medios filtrantes.
- Capacidad volumétrica en una sola instalación, las que pueden variar de 100 a 5 millones de pie^3/min .
- Caídas de presión y requerimientos de energía razonables, durante la operación.
- Capacidad para manejar una diversidad de materiales sólidos.

Entre las desventajas reconocidas se tienen:

- Posibilidad de explosión por la presencia de chispas en las cercanías de una casa de bolsas.
- Por lo general, no es posible manejar materiales higroscópicos, debido a los problemas con la limpieza de las telas.

Este último aspecto limita grandemente la naturaleza de una corriente gaseosa que se pueda limpiar con el uso de un filtro de tela. Además, las partículas húmedas se pueden aglomerar sobre la tela del filtro, cuando se trata de manejar con el equipo, gases de escape que están a temperaturas cercanas a su punto de rocío. Suficiente transferencia de calor de un gas de escape, según se acerca a una casa de bolsas, puede conducir a la condensación del vapor de agua, y la posterior depositación de materiales húmedos sobre el filtro. Otra de las grandes desventajas de los filtros de tela es su limitada utilidad con respecto a las corrientes de gas que contengan materiales cáusticos.

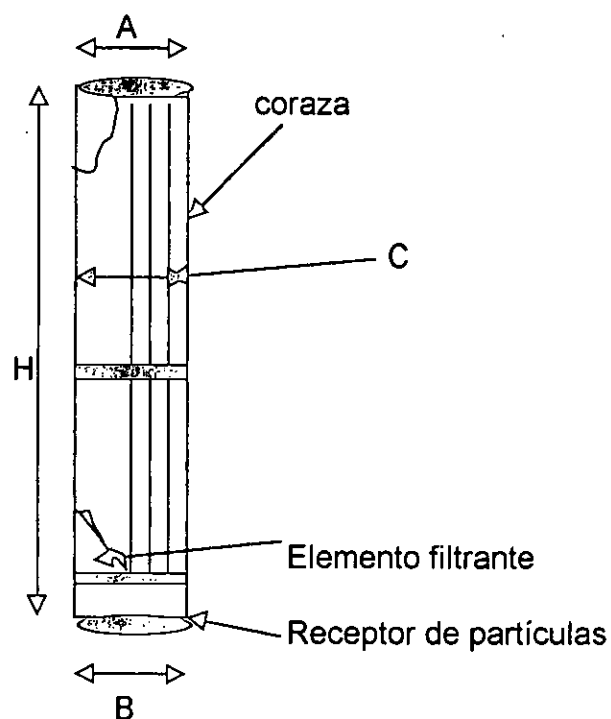
El costo inicial de un filtro de tela es alto, pero los costos de operación son menores, con el costo total a favor del filtro. Desde fines de la década de los años setenta, los filtros han resultado altamente competitivos con otros recolectores de partículas para proyecto de muy grandes dimensiones.

El tamaño de la casa de bolsas (número de bolsas) determina en gran parte el costo del sistema filtrante. Los costos iniciales, según el año 1997, son aproximadamente de \$US 15.00 para una capacidad de un pie cúbico por minuto, con los costos de instalación de cerca de 0.75 a 1.3 veces el costo del equipo. Los costos de mantenimiento son elevados, variando entre 10 y 25% de los costos iniciales por año, ya que es necesario reemplazar las bolsas.

Características constructivas Standard

- El material de construcción debe cumplir con las características recomendables para el tipo de gas a limpiar.
- Resistencia al calor mayor a 95°C en operación continua.
- Cumplir con el espacio mínimo entre la pared del recipiente del filtro y el medio filtrante (>30 mm).

- Utilizar en la elaboración de la bolsa material que cumpla con las características de un material filtrante de alta eficiencia.
- Cubierta del filtro de polypropileno o algún metal poco corrosivo.
- Diseño compacto que cumpla con las especificaciones de construcción adecuadas: (Figura II.10)



Dimensiones Standard:

- A = 180 mm
- B = 159 mm
- C = 157 mm (interior)
- H = varia según la aplicación

Figura II.10 Dimensiones Standard de los Filtros

II.3.4 Fabricantes

Nombre de la empresa	Aplicaciones	Contacto en México (dirección)
<p>Herding S.A August-Borsig-Str3,D92224 Alemania Tel: 630-0 Fax: 630120</p>	<p>Industria automotriz, química, vidrio, plásticos, alimentos, metal- mecánica, acero, cemento</p> <ul style="list-style-type: none"> - Hacen los estudios pertinentes para que los ciclones sean los adecuados - Ofrecen mantenimiento en general de instalaciones ya en uso y cambios de filtros. 	<p>Calle Cuauhtemoc #335 – altos Col. Tepepan pueblo C.P. 16020 México D.F. Tel : 6414537 Fax: 6414575</p>
<p>CVM corporation 402 Vandever Avenue Wilmington, Delaware # 19802 Tel : (302)654-7070 Fax: (302)6542772</p>	<p>Especialista en la industria textil, automotriz, metálica y del acero.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ofrece una eficiencia entre el 95-99%. <p>sus refacciones son durables y pueden limpiarse manualmente.</p>	
<p>Croll-Reynolds Inc. P.O. Box 668,751 Central Avenue Westfield,NJ 079091-0668 Tel (908) 232-4200</p>	<p>Empresa dedicada al diseño y construcción de dispositivos de control de contaminantes atmosféricos.</p>	
<p>Micro air –pollution Filtertechnik P.O. Box 4569, Central Avenue Westfield NJ 045899-06654 Tel (908) 222-4200</p>	<p>Empresa fundada en 1950 con amplia experiencia en proyectos llave en mano. Para el control de emisiones contaminantes.</p>	

II.4.5 Ejemplo del diseño de una Casa de Bolsas

El aire a 170°F (76.6°C) pasa a través de un filtro de tela durante un período de 5.40 h, después del cual la caída total de presión se mide como 4.74 pulgadas de agua (0.1638 m.c.a). La densidad de la torta de filtro es de 1.28 g/cm³ y la caída residual de presión a través del filtro limpio, antes de la prueba es de 0.55 pulgadas de agua. La velocidad del aire se mantiene a 4.20 pie/ min.(0.2136 m/s). durante la prueba, y la carga inicial de polvo es de 14.0 g/pie. Estímese la permeabilidad K_p de la capa de polvo en unidades de pie cuadrado (pie²). Tómese en cuenta que la casa de bolsas se instalará en un lugar húmedo, y que los filtros estarán propensos al ataque de ácidos minerales.

Se usará la ecuación (14) como la base de los cálculos, ya que contiene al tiempo como una variable. Al reescribir esta ecuación se observa que:

$$K_p = \frac{V^2 (Ld) (t)(\mu)}{\Delta p p(\rho)} \quad \text{Ec. 17}$$

La viscosidad del aire a 170°F es de 0.0503 lb/pie-h, sabemos que una diferencia de presión de 1 pulgada de agua equivale a 0.0361 lb-pie/pulg².

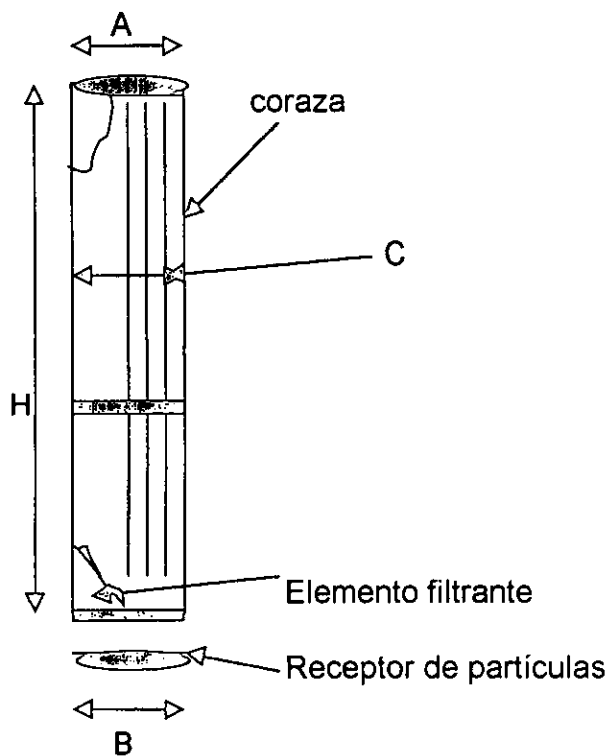
La caída de presión a través del polvo depositado es de (4.74-0.55)= 4.19 pulgadas de agua, que equivale entonces a 0.151 lb*pie/pulg². Empleando los valores apropiados, se encuentra que :

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{(4.20 \text{ pie/min})^2 (14.0 \text{ gr/pie}^3)(0.0503 \text{ lb/pie} \cdot \text{h})(5.40 \text{ h})}{(1.28 \text{ g/cm}^3)(0.151 \text{ lbf/pulg}^2)(32.2 \text{ lbm} \cdot \text{pie/lbf} \cdot \text{s}^2)} \\ &= 10.78 \frac{\text{gr cm}^3 \text{ pulg}^2 \text{ s}^2}{\text{min}^2 \text{ pie}^3 \text{ g}} \\ &= 4.76 \times 10^{-11} \text{ pie}^2 \end{aligned}$$

donde se ha introducido el factor 32.2 para relacionar (lb_{masa}) con (lb_{fuerza}) por medio de la segunda Ley de Newton. Por lo general, se encuentra que la permeabilidad de los polvos es un número extremadamente pequeño cuando se expresa en unidades de pies cuadrados.

Esta permeabilidad la cumple la cumple un filtro de algodón que presentaría las siguientes características (ver Figura II.11):

- Temperatura máxima de operación: 180°F
- Densidad específica 11.5gr/cm³ > 1.28 gr/cm³
- Como la casas de bolsas se instalará en un lugar húmedo, el algodón presentará un buen comportamiento. ante dicha humedad y ante el ataque de ácidos minerales



Dimensiones Standard:

- A = 180 mm
- B = 159 mm
- C = 157 mm (interior)
- H = 750 mm

Figura II.11 Características de los filtros de Algodón

La relación entre la caída de presión ΔP_p de las partículas y la velocidad superficial del gas (V), se conoce como el arrastre del filtro (S).

Se expresa frecuentemente en unidades de pulgada de agua/pie/min .

$$S = \frac{\Delta p_p}{V} = R_p V (L_d) t$$

Ec.18

Este parámetro nos permite observar el comportamiento del filtro ya que en los ciclos de limpieza la eficiencia baja considerablemente.

Cuando está la tela limpia existe una superficie irregular del elemento filtrante, por lo que el arrastre del filtro es mínimo, pero conforme se vaya formando la torta, la superficie del filtro se vuelve lisa, por lo que el arrastre del filtro es mayor. (Ver Figura II.12)

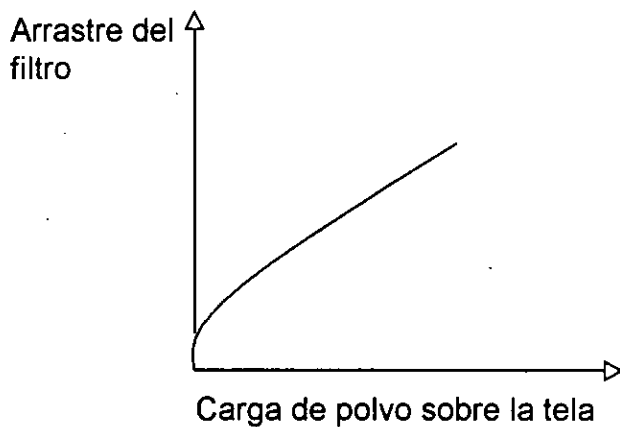


Figura II.12 Relación arrastre del filtro- carga de polvo

II.5 Colectores húmedos

II.5.1 Aspectos Generales

En un colector húmedo, se utiliza un líquido, por lo general agua, para capturar las partículas o para aumentar el tamaño de los aerosoles. En cualesquiera de los dos casos, el tamaño aumentado resultante facilita la remoción del contaminante de la corriente de gas. Partículas finas, tanto líquidas como sólidas, que varían entre 0.1 y 20 μm se pueden remover de un modo efectivo de una corriente de gas, por medio de colectores húmedos. (ver Figura II.13)

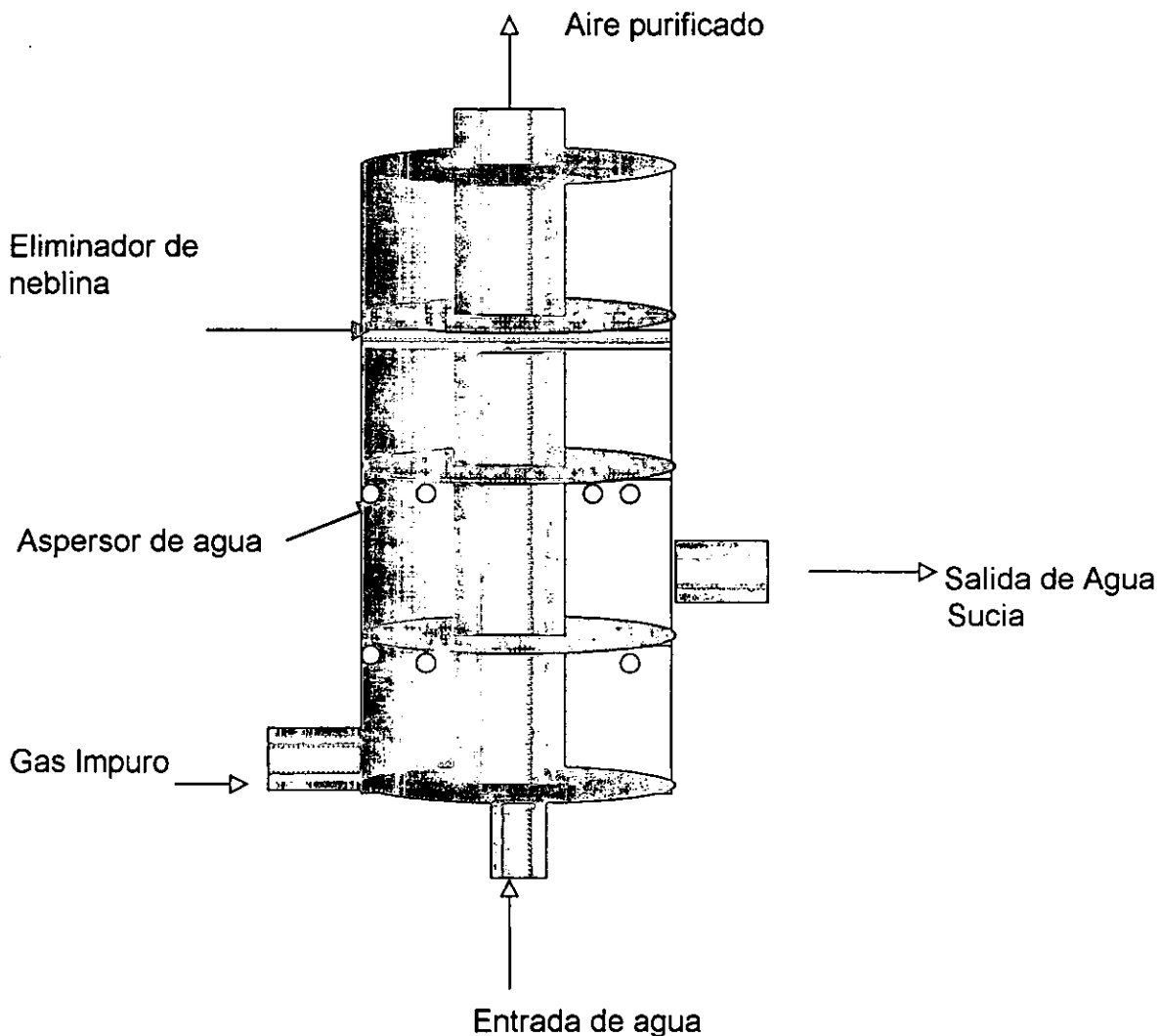


Figura II.13 Ejemplo típico de un colector húmedo

El fin primordial del dispositivo deberá ser la adecuada dispersión de la fase líquida a fin de obtener un buen contacto con la fase de las partículas (o de aerosol). Se venden industrialmente muchas distribuciones diferentes de los equipos básicos como son:

- Lavadores de cámaras de aspersion (con o sin placas de choque).
- Lavadores ciclónicos (ciclones húmedos).
- Lavadores venturi.

Los colectores húmedos ofrecen ciertas desventajas que no se encuentran en los equipos secos. Uno de los principales problemas es manipular y disponer de los lodos húmedos que son un producto inherente del proceso. No obstante, en algunas aplicaciones, podrá ser más fácil manejar los lodos que el polvo seco. Si el equipo está instalado en el ambiente natural, se deberá considerar el problema de la congelación en tiempo frío. El agua que se debe utilizar en los colectores debe estar libre de impurezas y la cantidad requerida dependerá de las dimensiones del colector y de la eficiencia requerida. La presencia del agua tiende a aumentar la corrosividad de los materiales. Finalmente, a fin de alcanzar eficiencias altas de colección para las partículas finas, se requiere una buena dispersión de la fase líquida, y esto requiere a su vez un consumo de energía relativamente alto.

A pesar de que uno o más mecanismos colectores se pueden usar dentro de la variedad de los equipos colectores húmedos, el principal requerimiento de estos dispositivos es la manera de iniciar el impacto de una partícula con una gotita de algún líquido (principalmente agua). Por tanto, es importante determinar cuáles propiedades de la partícula, gotas y del fluido de gas influyen en dicho choque. Considérese el modelo siguiente como un enfoque simplificado del problema.

Una partícula se acerca a una gota, como se muestra en la Figura II.14 y experimenta una impactación por inercia. A cierta distancia corriente arriba de la gota, la partícula abandona la corriente de gas y se dirige a la gota. La partícula está ahora bajo dos fuerzas principales: su propia fuerza de inercia y la fuerza de arrastre debida al gas que la rodea. (No se tienen en cuenta fuerzas tales como las gravitacionales, eléctricas, magnéticas y térmicas).

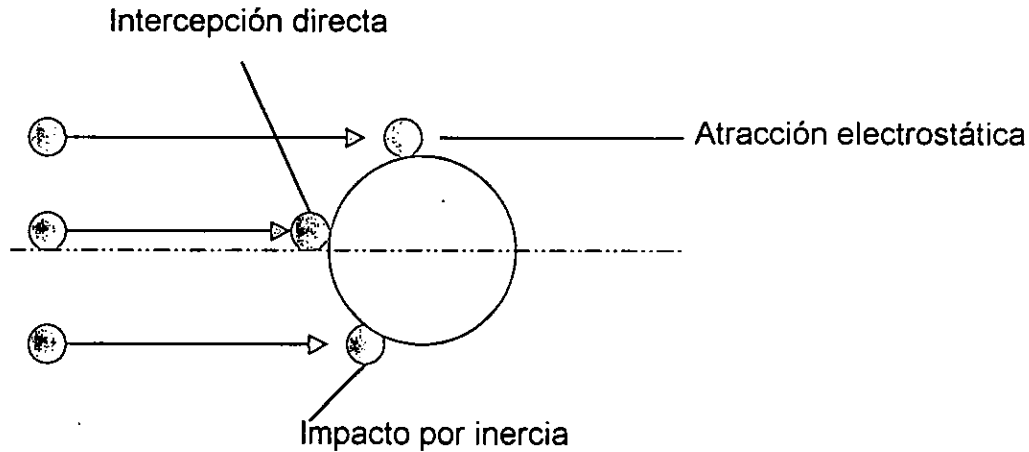


Figura II.14 Formas de intercepción de partículas

Como resultado de estas dos fuerzas, la partícula se detendrá finalmente con respecto a la pequeña gota. Si la distancia (X_s) a la que se detiene la partícula es mayor que la distancia original al punto en que abandonó la corriente de gas (p), tendrá lugar la impactación Figura II.15.

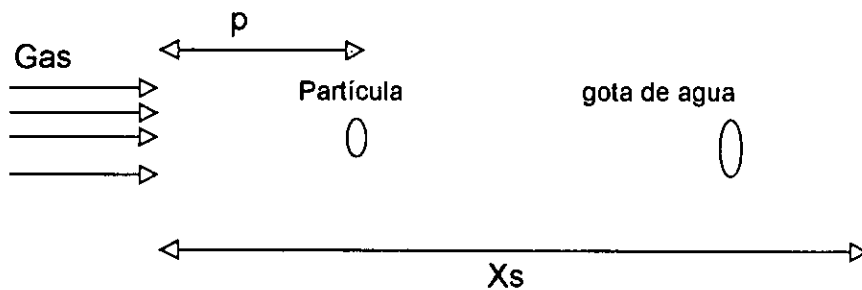


Figura II.15 proceso de impactación

Se define un número de impactación (N_i), como la relación adimensional entre la distancia de detención X_s y el diámetro de la gota dD :

$$N_i = \frac{X_s}{dD}$$

Ec.19

Se puede deducir una expresión explícita para la distancia de retención si se supone la validez de la ley de Stokes para el movimiento de la partícula. En términos de un equilibrio de fuerzas sobre la partícula, se observa que:

$$F \text{ inercia} + F \text{ arrastre} = 0$$

$$m_p \frac{dV_p}{dt} + 3 \pi V_p \mu dp = 0 \quad \text{Ec.20}$$

donde :

V_p = velocidad relativa de las partículas con respecto a las gotas de líquido.

m_p = masa de la partícula

μ = viscosidad dinámica del gas

dp = diámetro de la partícula

Si se supone que las partículas no son esféricas, con una densidad ρ_p , y se observa que por la regla de la cadena:

$$dvp/dt = (dVp/dx)(dx/dt) = (dVp/dx) (dx/dt)$$

se tiene que :

$$\frac{\pi dp^3 \rho_p}{6} V_p \frac{dV_p}{dx} + 3\pi V_p \mu dp = 0 \quad \text{Ec.21}$$

Al cancelar los términos comunes y reordenar, se observa que:

$$- \int_{V_{p0}}^0 \frac{dp^2 \rho_p}{18\mu} dV_p = \int_0^{x_s} dx \quad \text{Ec.22}$$

El término de la izquierda se integra desde V_{p0} la velocidad inicial de la partícula relativa a la fuente de gas, hasta 0, mientras que el lado derecho se integra desde 0 a la distancia de detención, x_s . El resultado de la integración es:

$$x_s = \frac{V_p dp^2 \rho_p}{18\mu} \quad \text{Ec.23}$$

En la mayoría de los casos, V_p representa también, inicialmente, la velocidad de la corriente del gas relativa a las gotas del líquido. La sustitución de la ecuación (5) en la ecuación (6) demuestra que el número de impactación, está dado aproximadamente por:

$$N_i = \frac{V_p dp^2 \rho K_c}{18\mu d_b} \quad \text{Ec.24}$$

donde :

V_p = velocidad de entrada del Gas en {m/s}

K_c = factor de corrección de Cunningham

dp = diámetro de la partícula en {m}

d_b = diámetro de la gota del líquido {m}

μ = viscosidad dinámica del gas {Pa*s}

ρ = densidad de la partícula {gr/cm³}

donde:

$$K_c = 1 + \frac{6.21 \times 10^{-4}(T)}{dp}$$

donde:

T = temperatura absoluta del medio en {°K}

Se debe observar cuidadosamente que algunos investigadores definen el número de impactación como la relación entre la distancia de detención y el radio de la gota. En tales casos, la constante de 18 pulgadas en el denominador de la ecuación (6) se sustituye por un valor de 9.

$$N_i = \frac{V_p(dp^2)(\rho) K_c}{9\mu(d_b)} \quad \text{Ec.25}$$

Esta definición alternativa de N_i cambiará las representaciones analíticas y gráficas en la literatura (por tanto, se debe tener cuidado al emplear tales datos). El número de impactación es adimensional; por tanto, se deben elegir unidades adecuadas para los términos del lado derecho. Para una partícula de un tamaño y densidad dados, el número de impactación es directamente proporcional a la velocidad relativa (V_p) e inversamente proporcional al diámetro de la gota de líquido.

Lavadores de cámara de aspersión

Uno de los dispositivos más simples para la colección húmeda de partículas es la torre de aspersión, circular o rectangular, como se muestra en la Figura II.13. El gas contaminado fluye hacia arriba y las partículas chocan con las gotas del líquido producidas por boquillas apropiadas situadas a través del paso del flujo. Si la tasa de flujo del gas es relativamente baja, las gotas del líquido contaminado se sedimentarán por gravedad hacia el fondo de la torre. Se coloca un eliminador de neblina en la parte superior de la torre para eliminar tanto el exceso de gotas de agua limpia como de gotas de agua sucia, (las que son muy pequeñas y, por tanto, las arrastra el flujo ascendente del gas).

También existe un diseño alternativo del tipo de flujo cruzado (Figura II.16). El agua se aspersiona desde lo alto de la cámara, el gas contaminado fluye horizontalmente a través de la cámara. La partícula es capturada por choque de inercia, y las gotas mayores, caen al fondo por sedimentación gravitacional. También aquí será necesario colocar algún tipo de eliminador de neblina a continuación de la sección de aspersión a fin de eliminar las gotas que todavía no se han depositado en la superficie del agua en el fondo. Una técnica típica consiste en colocar deflectores verticales después de la sección de aspersión.

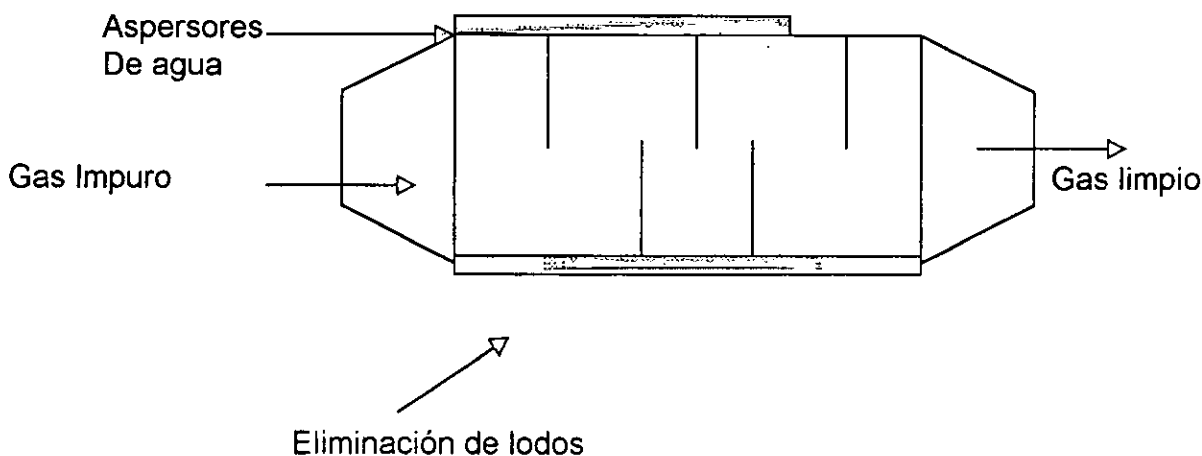


Figura II.16 Colector húmedo horizontal

El gasto de agua a través de un lavador de cámara es de 7 a 30 L/min para cada 1,000 pie³/min de flujo de gas. Es preciso añadir agua de reposición para surtir de nuevo la evaporada en la corriente de gas. En la mayoría de los casos será necesario recircular el agua utilizada. Por tanto, se requieren estanques de sedimentación en el área de la planta y, debido a que el agua recirculada no está completamente limpia, se deberán utilizar boquillas especiales o gruesas, para impedir el bloqueo y la erosión de las boquillas de aspersión. La caída de presión es muy pequeña en este tipo de equipo, usualmente del orden de 1 a 2 pulgadas de agua. La eficiencia colectora es muy aceptable para tamaños de partículas por arriba de 10 μm . La eficiencia de una torre de aspersión convencional va desde 94% para partículas de 5 μm hasta 99% para partículas de 25 μm . El uso de deflectores para incrementar el tiempo de contacto entre el gas y el líquido produce eficiencias de 97% para partículas de 5 μm o casi de 100% para partículas de 10 μm . Se pueden obtener eficiencias altas para tamaños de partículas de hasta 1 μm , utilizando aspersores de niebla de alta presión. Sin embargo, los requerimientos de energía aumentan directamente, y el agua recirculada puede que no sea adecuada en impedir el bloqueo de las boquillas.

Lavadores ciclónicos

El tipo más simple de lavadores ciclónicos se obtiene insertando bancos de boquillas en forma de anillo dentro de un ciclón seco convencional. El aspersor actúa sobre las partículas en el vórtice exterior, y las partículas del líquido, cargadas de polvo son lanzadas hacia fuera, contra la pared interna húmeda del ciclón. La solución cargada de polvo fluye por las paredes hasta el fondo, donde es retirada. El aspersor de agua también puede ser colocado en la entrada del ciclón. Se requiere usualmente un eliminador de neblina a la salida.

En otra versión, el gas sucio se introduce a través de una boquilla múltiple axialmente colocada, la que lanza el agua radialmente hacia afuera a través del flujo gaseoso en espiral. Si hubiera suficiente altura sobre la región de aspersión, la sección superior del cilindro puede actuar como un eliminador de neblina.

El gasto de circulación del agua en los ciclones húmedos varía de 4 a 20 L /1,000 pie³ de gas tratado. La pérdida de tiro o caída de presión varía usualmente entre 1 y 4 pulgadas de agua. Este último intervalo depende de la distribución interna del equipo. En general, los ciclones húmedos tienen una eficiencia colectora de 100% para gotas de 100 μm y mayores, alrededor de 99% para gotas de 50 a 100 μm y de 90 a 98% para gotas entre 5 y 50 μm .

Lavadores venturi

Un venturi es un canal de flujo rectangular o circular que converge a una garganta de sección estrecha y luego diverge nuevamente a su área original en la sección transversal. En la sección convergente, el trabajo del flujo asociado con el fluido se convierte en energía cinética, con una disminución de la presión estática y un aumento en la velocidad. Esta última alcanza valores de 160 a 600 pie/s (50 a 180 m/s) en la sección de la garganta. La relación de áreas entre la entrada y la garganta es típicamente de 4:1 en un lavador venturi. El ángulo de divergencia es aproximadamente de 5 a 7° a fin de obtener una buena recuperación de la presión estática. La acción de lavado ocurre durante la introducción de agua, ya sea en la sección de la garganta (recomendada), o al comienzo de la sección convergente. En la Figura II.17 se muestra un lavador venturi rectangular, vertical y descendente, con inyección en la garganta.

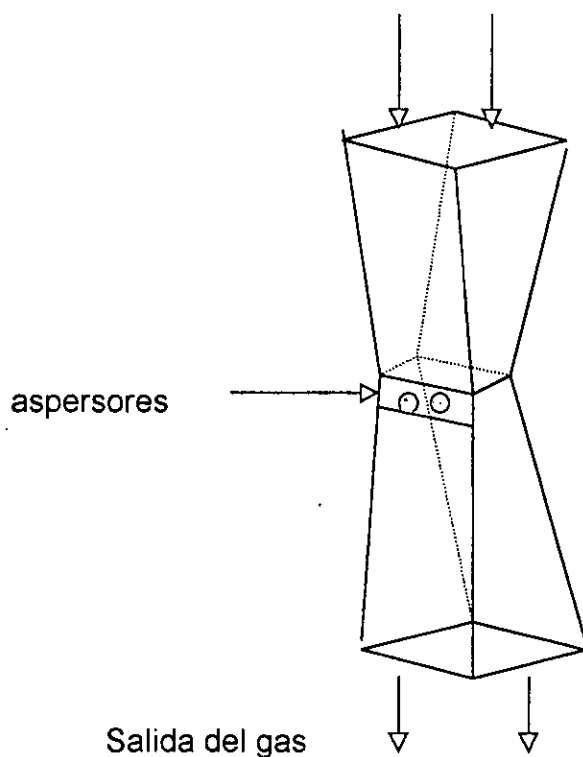


Figura II.17 lavador venturi rectangular

Un banco de boquillas a cada lado de la garganta inyecta agua a la corriente gaseosa de alta velocidad. El líquido de lavado también se puede inyectar en la corriente de gas, a través de ranuras o vertedores situados a cada lado de la garganta del venturi. El gas a alta velocidad atomiza el líquido inyectado en la corriente de gas. Es esencial una buena atomización si es que se va a disponer de suficientes blancos (partículas) para la impactación por inercia. Se supone normalmente que las partículas finas entran a la garganta del venturi con una velocidad igual a la de la corriente de gas. Por otra parte, se supone que las gotas del líquido de lavado no tienen inicialmente velocidad axial, y que se aceleran a través del venturi por el arrastre aerodinámico de la corriente del gas.

II.5.2 Diseño

La colección de las partículas finas por las gotas del líquido se lleva a cabo con el impacto por inercia durante el tiempo en que se aceleran las gotas. Según la velocidad de la gota se acerca a la del gas, y la velocidad relativa entre la partícula y la gota se acerca a cero, la probabilidad de la impactación por inercia corriente abajo de la garganta disminuye rápidamente. Como la eficiencia colectora por impactación se incrementa con el aumento en la velocidad relativa, son esenciales las altas velocidades de entrada del gas.

A pesar que los lavadores venturi han disfrutado de amplia aplicación en la remoción de partículas, se carece de ecuaciones de diseño confiables para la eficiencia colectora, los lavadores venturi actuales se rigen por ecuaciones de diseño basadas principalmente en datos experimentales:

Ecuación de JOHNSTONE y TASSLER:

$$\eta = 1 - e^{(-kr\sqrt{f})} \quad \text{Ec.26}$$

donde:

η = eficiencia

k = coeficiente de correlación, m^3 de gas por m^3 de líquido

r = relación m^3 de líquido / m^3 de gas

f = parámetro de impactación de partículas por inercia

Donde:

$$f = \frac{C(\rho) v (dp)^2}{18 d \mu} \quad \text{Ec. 27}$$

donde:

C = factor de recolección de Cunningham

ρ = densidad de la partícula en kg/m^3

v = velocidad del gas en la garganta

dp = diámetro de la partícula en {m}

d = diámetro de la gota del líquido {m}

μ = viscosidad dinámica del gas en {Pa * s}

$$C = 1 + \frac{6.21 \times 10^{-4}(T)}{dp}$$

donde:

T = temperatura absoluta del gas en ° K

En el Cuadro II.14 se muestran valores de la viscosidad dinámica en función de la temperatura del gas en la garganta del lavador.

Cuadro II.14 viscosidad dinámica de un gas

Temperatura °C	Viscosidad Dinámica μ
0	17.1
5	17.4
10	17.7
15	17.9
20	18.2
25	18.5
30	18.7
35	19
45	19.5
50	19.8
55	20.1
60	20.3
65	20.6
70	20.9
75	21.1
80	21.4
85	21.7
90	21.9
95	22.2
100	22.5

Basándose en una correlación de datos experimentales de muchos lavadores venturi diferentes, Calvert dedujo la siguiente ecuación que involucra a la eficiencia de los venturi:

P_t = penetración = 1- eficiencia

Donde:

$$P_t = \exp \left[- \frac{6.1 \times 10^{-11} (\rho_l)(\rho_p) K_c (d_p^2) f^2 (dp)}{\mu^2} \right] \quad \text{Ec. 28}$$

donde :

ρ_l = densidad del líquido [gr / cm³]

ρ_p = densidad de la partícula [gr / cm³]

μ = viscosidad del gas en [kg / m*seg]

d_p = diámetro de la partícula en [micrómetros]

f = coeficiente experimental dado entre [0.1 – 0.4]

K_c = corrección de Cunningham:

$$K_c = 1 + \frac{9.73 \times 10^{-3} * T^{0.5}}{d_p}$$

T = [°K]

dp = es la caída de presión a través del venturi en [cm de H₂O]

se puede calcular dp de la siguiente manera:

$$dp = -1.02 \times 10^{-3} (u^2) \left(\frac{Q_l}{Q_g} \right) \quad \text{Ec. 29}$$

donde :

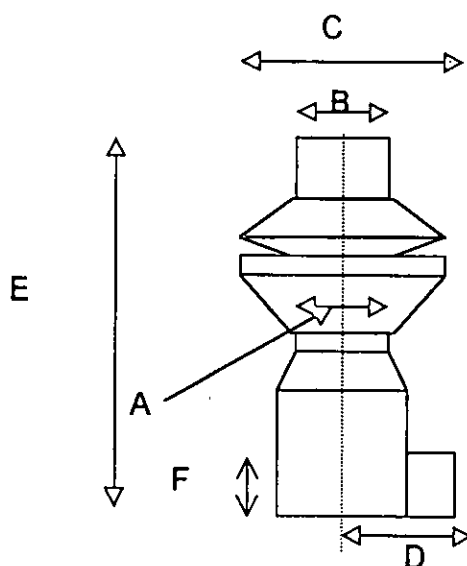
u = es la velocidad del gas

Q_l = gasto volumétrico del líquido

Q_g = gasto volumétrico del gas

II.5.3 Especificaciones y construcción

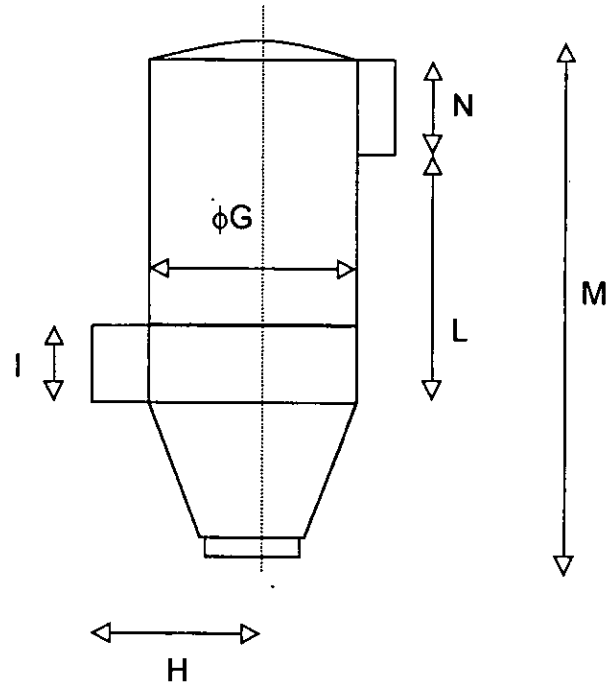
En los Cuadros II.15 y II.16 se presentan los valores de las dimensiones de lavadores Venturi comerciales.



Mediciones en mm.

Cuadro II.15 dimensiones de un Lavador Venturi

TAMAÑO	A	B	C	D	E	F	m ³ /Hr.	m ³ /seg.
12	125	650	1000	500	1050	150	750	0.21
20	200	750	1250	650	1150	150	1800	0.50
27	275	800	1300	650	1250	150	2600	0.72
36	360	900	1400	700	1450	200	5600	1.56
45	450	1000	1600	800	1500	200	9000	2.50
50	500	1100	1700	850	1650	200	11000	3.06
63	630	1500	2100	1050	2150	200	18000	5.00
72	720	1600	2200	1100	2250	250	22000	6.11
80	800	1700	2300	1150	2300	250	28000	7.78
90	900	1800	2400	1200	2850	250	35000	9.72
100	1000	1900	2600	1300	2950	250	44000	12.22
112	1120	2100	2100	2600	3150	250	56000	15.56
120	1200	2200	2900	1450	3350	300	63000	17.50
130	1300	1300	2300	1500	3725	300	74000	20.56
140	1400	2400	3100	1550	3550	300	86000	23.89
150	1500	2500	2500	1600	3600	300	98000	27.22
160	1600	2700	3400	1700	4375	400	112000	3.11
170	1700	2800	3500	1750	4450	400	127000	35.28
180	1800	2900	3600	1800	4550	400	142000	39.44
220	2200	3600	4300	2150	4650	400	212000	58.89



Cuadro II.16 Dimensiones del complemento de un lavador venturi

TAMAÑO	ϕG	H	I	K	L	M	N	O	m ³ /Hr	m ³ /seg
32	320	200	100	100	540	1025	75	150	800	0.22
45	450	250	175	125	740	1300	100	200	1500	0.42
63	630	350	225	175	900	1800	150	300	3000	0.83
80	800	450	300	250	1050	2150	175	350	5000	1.39
90	900	500	375	275	1230	2525	225	450	6000	1.67
112	1120	600	400	325	1400	2925	275	525	10000	2.78
130	1300	700	500	375	1550	3275	300	625	13000	3.61
140	1400	750	550	450	1650	3600	325	675	16000	4.44
150	1500	800	600	450	1800	3925	375	775	18000	5.00
170	1700	900	700	500	1900	4200	400	1000	24000	6.67
180	1800	950	750	550	2120	4600	450	1075	27000	7.50
200	2000	1050	825	600	2275	5000	500	1150	34000	9.44
210	2100	1100	875	675	2550	5300	550	1225	38000	10.56
230	2300	1200	950	700	2675	5750	600	1300	46000	12.78
240	2400	1250	1025	750	2725	6000	625	1375	50000	13.89
260	2600	1350	1075	800	2800	6350	675	1450	60000	16.67
280	2800	1450	1225	900	3100	7000	750	1600	70000	19.44
300	3000	1550	1275	950	3250	7350	775	1675	82000	22.78
320	3200	1650	1350	975	3375	7750	825	1750	94000	26.11
340	3400	1750	1425	1025	3525	8150	875	1825	107000	29.72
360	3600	1850	1650	1125	4100	9150	975	200	121000	33.61

II.5.4 Fabricantes

Nombre de la empresa	Aplicaciones	Contacto en México (dirección)
<p>Herding S.A August-Borsig-Str3,D92224 Alemania Tel: 630-0 Fax: 630120</p>	<ul style="list-style-type: none"> - El departamento de diseño ubicado en la CD. de México ofrece apoyo técnico para el manejo de colectores de diferentes tipos y tamaños - Para el diseño de nuevas aplicaciones, cuentan con sistemas de financiamiento que se apegan a las necesidades requeridas en las Normas Oficiales Mexicanas. - Ofrecen mantenimiento en general de instalaciones ya en uso. 	<p>Calle Cuahutémoc #335 – altos Col. Tepepan pueblo C.P. 16020 México D.F. Tel : 6414537 Fax: 6414575</p>
<p>CVM corporation 402 Vandever Avenue Wilmington, Delawere # 19802 Tel : (302)654-7070 Fax: (302)6542772</p>	<p>Especialista en la industria textil, automotriz, metálica y del acero.</p> <ul style="list-style-type: none"> - entre sus servicios se encuentran dispositivos automáticos para el control del agua que entra al colector - Cuenta con varios tipos de dispersores que aumentan la eficiencia del equipo. 	
<p>Croll Reynolds Inc. P.O. Box 668,751 Central Avenue Westfield, NJ 07091-0668 Tel (908) 232-4200</p>	<p>En el diseño y construcción de colectores húmedos es la mejor opción, pues cuenta con el equipo necesario para la colocación en obra del equipo requerido.</p>	

II.5.5 Ejemplo del diseño de un colector húmedo

Se introduce agua a la garganta de un lavador venturi a una tasa de 1.0 l/m³ de flujo de gas. La velocidad del aire es de 400 pies/seg (122 m/s), su densidad es de 0.072 lb/pie³, y su temperatura es de 170°F (76.6°C). El área de la garganta es de 125 pulg² (.08 m²), el parámetro f tiene un valor de 0.25, la densidad de las partículas es de 1.5 gr/cm³ y el factor de corrección de Cunningham es de 1.182.

- a) determínese la eficiencia de dicho lavador venturi.
- b) establezca las dimensiones comerciales para las condiciones establecidas.

Utilizando la ecuación (28):

$$P_t = \exp \left[- \frac{6.1 \times 10^{-11} (\rho_l)(\rho_p) K_c (d_p)^2 f^2 (dp)}{\mu^2} \right] \quad \text{Ec.28}$$

sustituyendo:

$$P_t = \frac{-6.1 \times 10^{-11} (1) (1.5) (1.182) (1)^2 (0.25) (153.3)}{(2.08 \times 10^{-5})^2} = 0.095$$

$$\text{eficiencia} = (1 - P_t) \times 100 = 90.5 \%$$

Para establecer las dimensiones comerciales, obtenemos el gasto que pasa por la sección de la garganta.

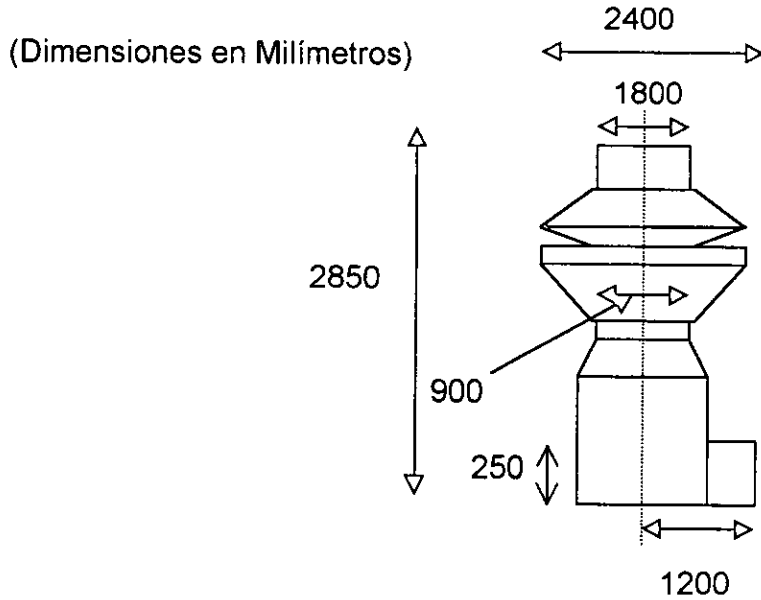
La Garganta del lavador venturi tiene un área de 125 plg² = 0.8 pies²

La velocidad del aire es de 400 pies/ seg por lo tanto el Gasto que pasa por la sección es de:

$$Q = (400 \text{ pies/seg}) (0.8 \text{ pies}^2) = 320 \text{ pies}^3 / \text{seg} = 9.061 \text{ m}^3 / \text{seg}$$

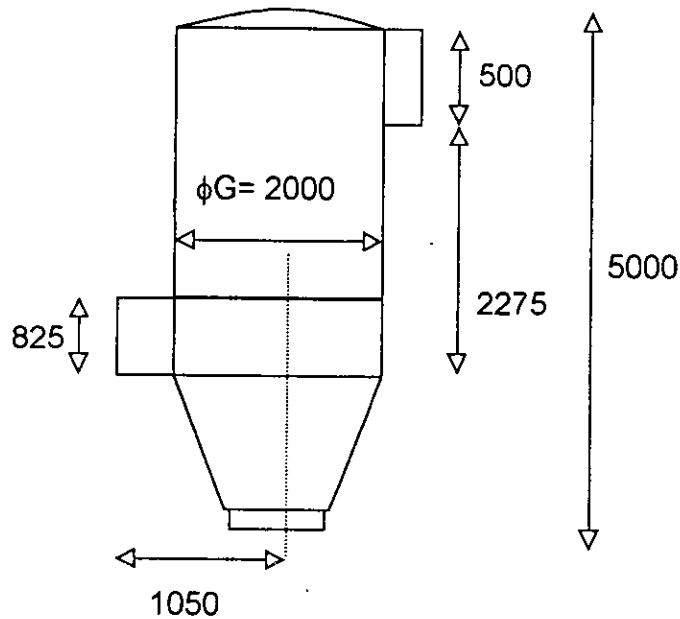
Del cuadro II.18 obtenemos las dimensiones del modelo que se ajusta al gasto requerido, en este caso es el lavador venturi de tamaño 90.

Dimensionamiento del ejemplo de diseño de un lavador venturi.



Para el equipo complementario del Lavador Venturi se usará el tamaño 200.

(Dimensiones en Milímetros)



II.6 Precipitador electrostático

II.6.1 Aspectos Generales

La colección de partículas y aerosoles mediante la precipitación electrostática se basa en la mutua atracción entre las partículas con una carga eléctrica y un electrodo colector de polaridad opuesta (Ver Figura II.18).

Se han construido precipitadores electrostáticos para gastos volumétricos desde 100 a 4,000000 de pie³ y se utilizan para remover partículas entre 0.05 y 200 μm , con una eficiencia colectora que oscila entre 80 y 99%.

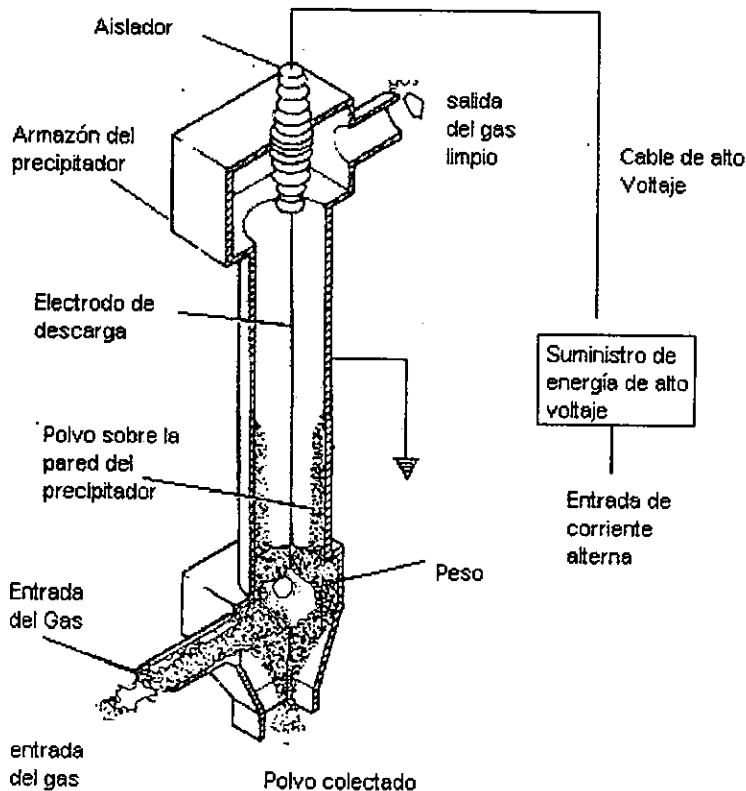


Figura II.18 Precipitador electrostático

La caída de presión es pequeña extendiéndose de 0.1 a 0.5 pulgadas de H₂O. Se pueden tener temperaturas de los gases de hasta 1200°F (920°K), y presiones de hasta 150 lb./pulg² (10 bars). Estas características explican el uso extensivo en las industrias, especialmente en el campo de la generación de energía.

Se utilizan diversos principios geométricos básicos en el diseño de los precipitadores electrostáticos. Uno de ellos es del tipo de tubo, en donde los electrodos consisten de alambres suspendidos axialmente dentro de un tubo. Se aplica un voltaje muy alto de corriente directa, entre el alambre y el tubo, y el gas sucio fluye hacia abajo por el tubo y a través del campo eléctrico establecido entre los electrodos. La Figura II.19 muestra el diseño típico de una unidad comercial en gran escala.

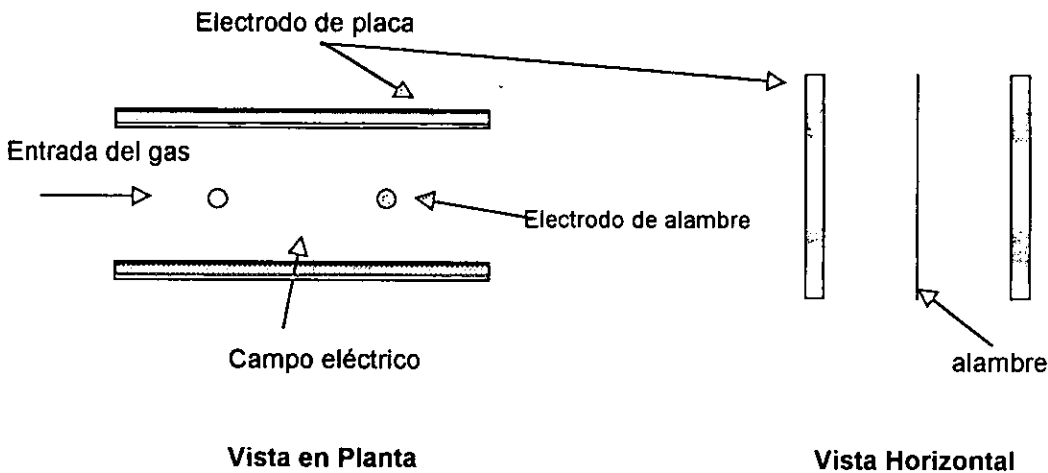


Figura II.19 Diseño típico de un precipitador electrostático

Se usan normalmente un gran número de placas paralelas, dependiendo del número de pasajes paralelos necesarios para tratar el gasto volumétrico requerido. Por lo general, el flujo es horizontal y los pasajes son estrechos del orden de 8 a 10 pulgadas (20 a 25 cm). La altura total de una plancha puede ser tan grande como 30 a 40 pies, con una longitud de 25 a 30 pies. Los alambres de alto voltaje se deben colgar precisamente en las líneas de centro de cada pasaje del gas. En la mayoría de los casos, los alambres están cargados de 20 a 100 kV por debajo del potencial de tierras y son bastante típicos con 40 a 50 kV (Si el aire que sale del precipitador va directamente a una región habitada, el electrodo central se carga positivamente para evitar la formación excesiva de ozono).

El diferencial de voltaje muy alto entre los electrodos hace que los electrones pasen a velocidades muy altas del alambre central a la corriente de gas que pasa. Los electrones se fijan a su vez a las moléculas de gas que pasan a través del dispositivo, y forman iones negativos (la existencia del gas fuertemente ionizado en los alrededores del alambre se hace evidente por un efecto visible de una corona azul). Bajo la influencia de la gran fuerza electrostática, los iones negativos emigran hacia las capas exteriores conectadas a tierra, mientras que los iones positivos regresan al alambre central (que es negativo con respecto a las placas conectadas a tierra).

II.6.2 Diseño

La primera etapa física en el mecanismo colector es una ionización del gas.

La segunda etapa es la carga de las partículas de polvo que se encuentran en la corriente de gas. Esta carga es el resultado de la colisión de las partículas con los iones cargados negativamente (figura II.6.3). No existe dificultad alguna para cargar las partículas de gas, puesto que los iones están presentes en abundancia, y su tamaño es cuando menos varios órdenes de magnitud más pequeño que el polvo de tamaño submicrométrico. Teóricamente, la carga limitada "q" aplicada a una partícula esférica de diámetro d_p , mayor que $1\mu\text{m}$ es:

$$q = p \pi(\epsilon)(E_c)(d_p^2) \quad \text{Ec.30}$$

donde:

d_p = diámetro de la partícula {m}

ϵ = constante de permisividad = 8.85×10^{-12} (Culombios/Volt-m)

E_c = fuerza del campo eléctrico {V/m}

$$p = 3D/(D + 2)$$

D = la constante dieléctrica de la partícula. Como la constante dieléctrica para muchos tipos de polvo se encuentra entre 2 y 8, el factor p en la ecuación está por lo general entre 1.50 y 2.40.

La tercera etapa del mecanismo de colección es la migración de las partículas de polvo cargadas a las placas de electrodos, donde tiene lugar la colección del polvo. La velocidad a la que se efectúa la migración se conoce como **velocidad de migración** o de desplazamiento (**w**).

Depende de:

- la fuerza eléctrica sobre la partícula cargada.
- la fuerza de arrastre desarrollada cuando la partícula trata de moverse perpendicularmente al flujo principal de gas y hacia el electrodo colector.

La fuerza electrostática es proporcional a la carga sobre la partícula y a la fuerza **Ep** de precipitación o colección del campo. Empleando la ecuación (30), se encuentra que la fuerza electrostática (**Fe**), está dada por:

$$F_e = q(E_p) = \rho \pi \epsilon (E_c)(E_p) dp^2 \quad \text{Ec. 31}$$

La fuerza de arrastre sobre una partícula que está dentro de la región de flujo de Stokes, está representada por:

$$F_d = \frac{3 \pi \mu dp w}{K_c} \quad \text{Ec. 32}$$

donde K_c es el factor de corrección de Cunningham, que se debe aplicar a partículas con un diámetro menor de $10 \mu\text{m}$.

$$K_c = 1 + \frac{9.73 \times 10^{-3} (T^{0.5})}{dp} \quad (T \text{ en } ^\circ\text{K}) \quad \text{Ec. 33}$$

Al igualar las fuerzas eléctricas y de arrastre, la velocidad de desplazamiento para partículas esféricas en la región de flujo de Stokes (dp de 1 a $100 \mu\text{m}$ en el aire), está dada por:

$$w = \frac{\rho \epsilon (E_c)(E_p) dp K_c}{3\mu} \quad \text{Ec. 34}$$

donde :

w = está en {m/s},

d_p = diámetro de la partícula {m}

ϵ = constante de permisividad = 8.85×10^{-12} (Colombio/Volt-m)

E_c = fuerza del campo eléctrico {V/m}

μ = viscosidad dinámica del gas {Pa*s}

$$\rho = 3D/(D + 2)$$

D = la constante dieléctrica de la partícula

De aquí resulta que:

$$w = \frac{2.95 \times 10^{-12} \rho (E_c) (E_p) d_p K_c}{\mu} \quad \text{Ec. 35}$$

Si μg esta expresada en kg/m³h y d_p en μm , entonces la constante de la ecuación se convierte en 1.06×10^{-14}

La viscosidad del aire a condiciones ambientales (25°C y 1 bar) es de 0.068 kg/m-h. La ecuación teórica muestra que la velocidad de migración es directamente proporcional al diámetro de la partícula y el cuadrado de la fuerza del campo (si E_c y E_p son iguales) e inversamente proporcional a la viscosidad del gas. A pesar de ser independiente de la presión, la viscosidad del aire aumenta aproximadamente en un 50% entre 300° y 500°K (80° a 460°F). Por lo tanto, la velocidad de desplazamiento es sensible a los cambios de temperatura.

En la práctica, la velocidad real de desplazamiento puede desviarse considerablemente del valor teórico pronosticado por la ecuación (34). Esto se debe a que los precipitadores en la práctica no se pueden modelar mediante una pura transferencia electrostática de masa normal a un flujo laminar de gas ya que estarán presentes diversos grados de difusión turbulenta, junto con efectos de inercia.

Se cree también que un fenómeno como el viento de inercia contribuye a la migración. Se viola el criterio del flujo laminar de la ley de Stokes, cuando el número de Reynolds Re sea aproximadamente mayor de uno. Esta condición puede ocurrir bajo diversas combinaciones de gran tamaño de las partículas, altas densidades del gas, debido a presiones elevadas, y valores altos de los campos eléctricos. Sin embargo, la velocidad de migración de la partícula es una magnitud fundamental en todas las teorías que tratan de explicar y predecir el funcionamiento de los precipitadores electrostáticos.

Su valor en cálculos de diseño se deberá basar sobre observaciones de equipos que operen en condiciones similares a aquellas a las que se destina el diseño. Para partículas menores de 5 μm , la velocidad teórica de migración (o de desplazamiento) es usualmente menor de 0.3 m/s. Para las cenizas finas, la velocidad de migración por lo general se encuentra entre 0.01 y 0.2 m/s.

La última etapa para la colección electrostática de partículas es la depositación real de las partículas cargadas sobre el electrodo, con el posterior crecimiento de una capa de polvo. Las fuerzas adhesivas, cohesivas y eléctricas deberán ser suficientes para impedir la resuspensión de las partículas por la corriente de gas. Una propiedad de la capa de polvo que es extremadamente importante en la operación del precipitador, es la resistividad dieléctrica del polvo. Debido a la muy variable naturaleza de los polvos industriales, la resistividad puede variar de 10^{-3} a 10^{14} ohm-cm.

Cuando la resistividad es menor de 10^4 ohm-cm, existe un movimiento rápido de carga desde el polvo depositado hasta la placa colectora. Por lo mismo, sucede una ineficiente carga electrostática en las partículas de polvo colectadas que sea capaz de mantenerlas en su lugar. Es frecuente la resuspensión de las partículas hacia la corriente de gas, y cae la eficiencia de colección. Cuando las resistividades son mayores de aproximadamente 100 ohm-cm, son una fuente importante del mal funcionamiento de los precipitadores. Primero, una fracción considerable de la caída total del voltaje entre los electrodos tiene lugar a través de una capa de polvo de alta resistividad, como resultado del efecto de aislamiento eléctrico. Por tanto, sólo una porción de la energía total de la corona o halo eléctrico estará disponible para ionizar y empujar las partículas cargadas hasta el electrodo colector. Un segundo problema debido a la alta resistividad se conoce como contracorona o contraionización.

Este efecto ocurre cuando la caída de voltaje a través de la capa sobrepasa la fuerza dieléctrica de la capa. El aire atrapado dentro de la capa de polvo depositada se ioniza como resultado de la gran caída de potencial a través de la capa. Cualesquiera iones positivos que se formen tenderán a emigrar separándose de la placa colectora y a neutralizar las partículas ionizadas que se acercan a la placa. Esta situación disminuye la cantidad de partículas que se depositan. Además, la ionización puede llevar a la formación de chispas en la capa de polvo, las que pueden acarrear nuevamente el polvo depositado, a la corriente del gas. Estos efectos reducen la eficiencia colectora del precipitador.

La precipitación electrostática es más efectiva en la colección del polvo, dentro del intervalo de resistividad de 10^4 a 10^{10} ohm-cm. puesto que muchos de los polvos industriales no caen dentro de este intervalo, con frecuencia es necesario cambiar las condiciones de operación a fin de aumentar las eficiencias colectoras. Existen dos propiedades de los gases que ejercen una influencia considerable en la resistividad del polvo: la temperatura y la humedad.

El efecto de estos dos parámetros se muestra en la Figura II.20 que es representativa del polvo de los hornos de cemento. La forma de domo de la curva de temperatura contra resistividad es muy típica de las partículas industriales.

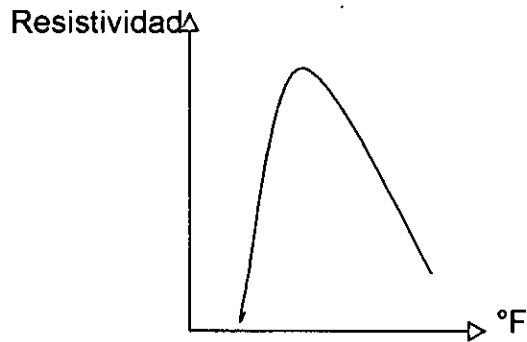


Figura II.20 Efecto de la temperatura en la resistividad

Para calcular la eficiencia de los precipitadores electrostáticos, nos basamos en la Figura II.21.

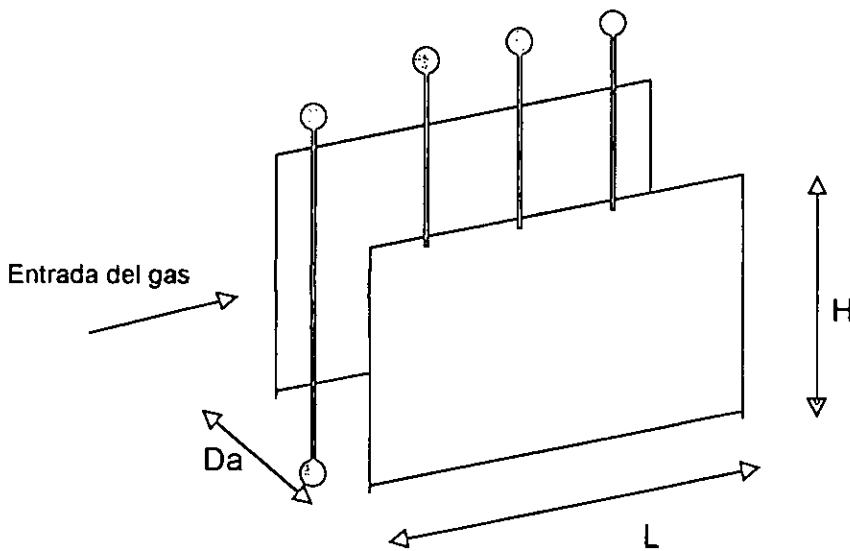


Figura II.21 Comportamiento interno de un precipitador electrostático

La masa removida la podemos expresar como :

$$u(H) \frac{Da}{2} C(x) - u(H) \frac{Da}{2} C(x + \Delta x) = \text{masa removida} \quad \text{Ec. 36}$$

donde:

u = velocidad del gas {m/s}

H = altura de la celda {m}

Da = espacio entre celdas {m}

$C(x)$ = concentración de partículas dentro de una distancia x {g/cm³}.

Agrupando los términos tenemos que:

$$\frac{-u(H) da}{2} \frac{dC}{dx} = w(H) C \quad \text{Ec. 37}$$

donde :

w = velocidad de entrada del gas {m/min}

Integrando de 0 hasta L la ecuación queda:

$$\ln\left(\frac{C_1}{C_0}\right) = \frac{-2HwL}{uhDa} = \frac{-2wAp}{Qc} \quad \text{Ec. 38}$$

donde :

Ap = área de una celda {m²}

Qc = volumen del gas a través de una canal {m³/min}

De esta ecuación se puede conocer la eficiencia del precipitador dada por:

$$\eta = \ln\left(\frac{C_1}{C_0}\right) = 1 - e^{(-w Ap / Qc)} \quad \text{Ec. 39}$$

II.6.3 Especificaciones y construcción

Por lo general, la materia particulada depositada se elimina de los electrodos colectores por impactos secos y por vibración. Se pueden recoger tanto las partículas sólidas como las líquidas. Cuando intervienen las partículas líquidas, éstas emigran a las placas colectoras, donde se unen y caen por gravedad al fondo del colector. Los impactos secos a los electrodos a fin de eliminar las partículas sólidas, en general ocurren cuando el polvo ha formado una capa de 1/8 a 1/4 de pulgada. Las partículas contiguas a la placa pierden la mayor parte de su carga, mientras que el más reciente depósito de material está todavía altamente cargado. Con la atracción eléctrica relativamente débil entre las partículas adyacentes a la placa y la propia placa, el golpeteo tiende a desprender en grandes trozos el polvo colectado. Estas caen por gravedad a una tolva colocada más abajo. El golpeteo se debe controlar de manera que la cantidad de polvo fino que se libere, sea muy pequeña.

La longitud del pasaje del precipitador requerida para remover un tamaño determinado de partícula se puede estimar aproximadamente si se conoce la velocidad de desplazamiento. Después de tener en cuenta un período de carga, el tiempo requerido para que una partícula emigre al electrodo colector debe ser menor que el tiempo que le tomaría a la partícula para pasar junto con el gas a través del precipitador. Cuando estos tiempos sean exactamente iguales, dicho tamaño de partícula se colectará con una eficiencia del 100%, pero sin tolerancia de error. Para una eficiencia colectora teórica del 100% la longitud del pasaje de gas requerido está dada por:

$$L = \frac{Da(V)}{2w} \quad \text{Ec. 40}$$

donde:

- L = longitud del electrodo colector
- Da = distancia entre el electrodo de carga y el colector
- V = velocidad del gas en el pasaje de flujo

Especificaciones de construcción recomendables

En la Figura II.22 se muestran las principales dimensiones de un precipitador electrostático, y en el Cuadro II.17 se observan los rangos de valores en que varían dichas dimensiones dependiendo del fabricante.

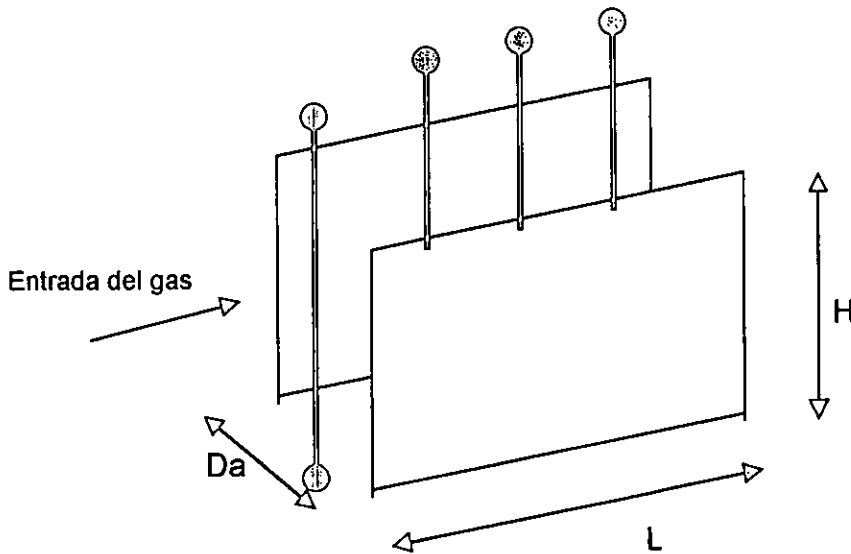


Figura II.22 Principales dimensiones de un precipitador electrostático

Cuadro II.17 Valores de las dimensiones de un precipitador electrostático

Parámetro	Rango de valores
Da	15-40 cm.
Area de las placas colectoras	0.25-0.21 m ²
Relación: Largo/ Ancho	0.5-1.5
Velocidad del gas	1.2-2.5 m/s
Número de secciones eléctricas:	2-8
H	8-15 m
L	1-4 m

El ancho de un precipitador es prácticamente igual al número de ductos por donde pasa el gas contaminado:

$$Nd = \frac{Q}{u(Da)(H)} \tag{Ec. 41}$$

donde:

- Nd = número de ductos
- Q = gasto volumétrico {m³/min.}
- u = velocidad lineal del gas {m/min.}
- Da = ancho del canal entre celdas {m}
- H = altura de las celdas {m}

El largo de un precipitador lo podemos obtener (Ver Figura II.23):

$$Lo = Ns Lp + (Ns - 1) Ls + Len + Lex \tag{Ec. 42}$$

donde :

- Lo = total de largo {m}.
- Ns = numero de secciones eléctricas en dirección del flujo.
- Lp = largo de las placas colectoras.
- Ls = espacio entre secciones eléctricas {m}.
- Len = largo de la entrada al precipitador {m}.
- Lex = largo de la salida del precipitador {m}.

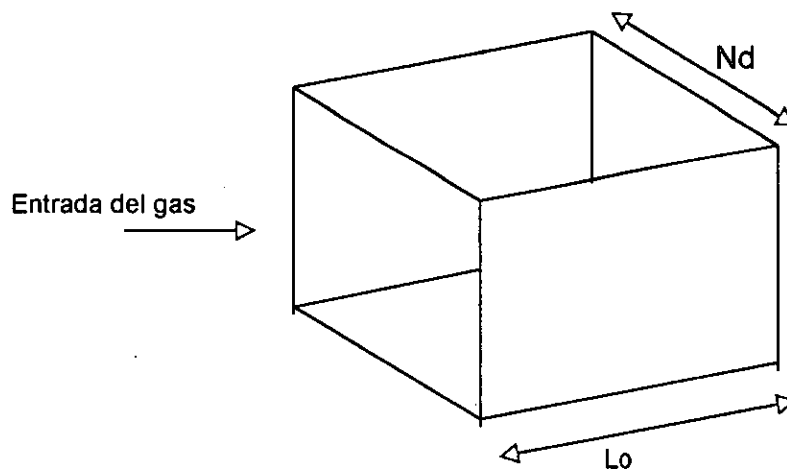


Figura II.23 Esquema general del Largo y Ancho de un precipitador electrostático

II.6.4 Fabricantes

Nombre de la empresa	Aplicaciones	Contacto en México (dirección)
<p>Herding S.A August-Borsig-Str3,D92224 Alemania Tel: 630-0 Fax: 630120</p>	<p>El departamento de diseño ubicado en la CD. de México ofrece apoyo técnico para el manejo de precipitadores de diferentes tipos y tamaños Para el diseño de nuevas aplicaciones, cuentan con sistemas de financiamiento que se apegan a las necesidades requeridas en las Normas Oficiales Mexicanas. Ofrecen mantenimiento en general de instalaciones ya en uso.</p>	<p>Calle Cuahutémoc #335 – altos Col. Tepepan pueblo C.P. 16020 México D.F. Tel : 6414537 Fax: 6414575</p>
<p>CVM corporation 402 Vandever Avenue Wilmington, Delawere # 19802 Tel : (302)654-7070 Fax: (302)6542772</p>	<p>Especialista en la industria textil, automotriz, metálica y del acero. - ofrece una eficiencia entre el 95-99% - cuenta con refacciones de precipitadores para diversos tipos y diseños. - entre sus servicios se encuentran dispositivos automáticos para el control de la energía requerida para la separación de las partículas.</p>	
<p>Croll Reynolds Inc. P.O. Box 668,751 Central Avenue Westfield, NJ 07091-0668 Tel (908) 232-4200</p>	<p>En el diseño y construcción de precipitadores es la mejor opción, pues cuenta con el equipo necesario para la colocación en obra del equipo requerido.</p>	

II.6.5 Ejemplo del diseño de un Precipitador electrostático.

Considérese un colector con un espaciamiento total de 23 cm (9 pulgadas) y un voltaje aplicado de 50 kV. La velocidad media del gas a través del colector es de 1.5 m/s. Estímese la longitud de la placa colectora requerida para una eficiencia colectora de 100% para partículas de 0.5 μm a 4200 °K.

Solución

Si se supone un valor de 2 para p , se utiliza primero la ecuación (34) para evaluar la velocidad de migración de desplazamiento, w .

$$w = \frac{1.1 \times 10^{-14} p E^2 dp}{\mu}$$

$$w = \frac{1.1 \times 10^{-14} (2)(50000 / 0.115)^2 (0.5)}{0.863} = 0.024$$

$$w = 90.024 \text{ m/s}$$

Con base en la ecuación (40), la longitud teórica del electrodo colector será:

$$L = \frac{Da V}{2w} = \frac{(0.23 / 2) 1.5}{0.024} = 7.2 \text{ m} = 23.6 \text{ pies}$$

La longitud práctica requerida para eliminar 99% o más de un tamaño dado varía mucho del valor teórico calculado, debido a las suposiciones impuestas al modelo teórico. Las desviaciones de tales suposiciones básicas como son un campo de precipitación uniforme, velocidad del gas uniforme, partículas esféricas, propiedades eléctricas uniformes, y así sucesivamente, son responsables de las diferencias entre la teoría y la práctica.

Se han propuesto varias ecuaciones que relacionan la eficiencia colectora de un precipitador electrostático con los varios parámetros de operación. Una de las expresiones frecuentemente citadas es la ecuación de Deutsch.

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-A w}{Q}\right)$$

Ec. 43

donde:

A = es el área de los electrodos colectores {m²}

w = es la velocidad de desplazamiento {m/s}

Q = es el gasto volumétrico {m³/s}

Deutsch propuso que la migración de las partículas fuera calculada como :

$$w = \frac{q E_p (c)}{6 \pi r (n)} \quad \text{Ec.44}$$

donde :

q = carga en colombios {C}

E_p = intensidad del campo de colección {volts/m}

r = radio de la partícula {m}

n = viscosidad dinámica del gas {Pa*s}

C = factor de corrección de Cunningham

Ejemplo :

Determine la eficiencia colectora del precipitador electrostático diseñado para la recolección de partículas de 154 μm de diámetro, teniendo una velocidad de 0.184 m/s.

Especificaciones :

Alto = 7.32 m

Largo = 6.10 m

Número de pasajes = 5

Espacio entre placas = 0.28 m

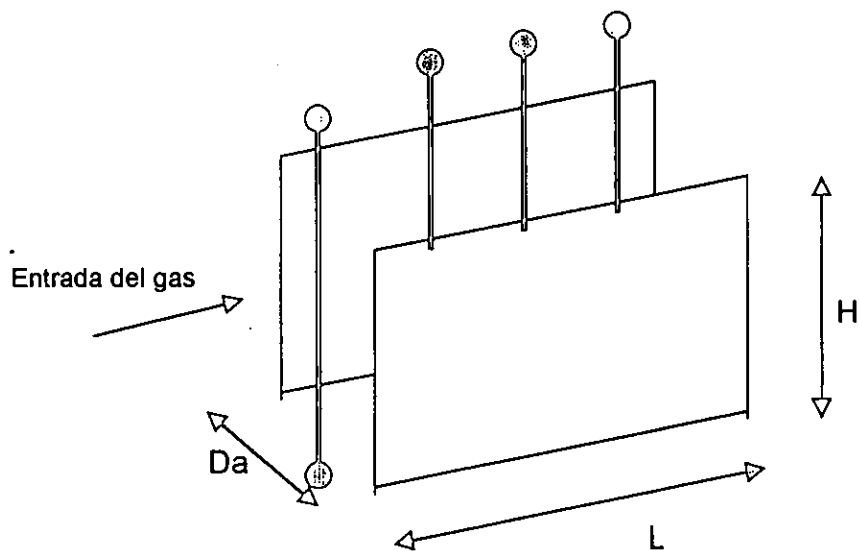
Tasa volumétrica del gas = 19.73 m³/seg

* Primero calcularemos el área de los platos

$$A = 07.32m (6.10m) = 44.65 \text{ m}^2$$

Así la superficie colectora será el total de superficies expuestas al gas:

$$A = 44.65 \text{ m}^2 (8) = 357.2 \text{ m}^2$$



La eficiencia es calculada con la expresión (43):

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-A w}{Q}\right)$$

sustituyendo :

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-357.2 * 0.184}{19.73}\right) = 0.964$$

por lo que la eficiencia será de 96.4%

CAPITULO III

III DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS PRINCIPALES DISPOSITIVOS DE CONTROL DE GASES

III.1 Principales parámetros para el diseño de dispositivos de control de gases

La mayoría de los contaminantes del aire reconocidos son gases, entre ellos están el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x) y los hidrocarburos no quemados en su totalidad (HC). Las principales fuentes de los contaminantes gaseosos son el consumo de combustibles fósiles y emisiones de gases y vapores durante procesos industriales, estos últimos pueden provocar concentraciones locales con niveles objetables.

La remoción de contaminantes gaseosos de una emisión presenta problemas por su homogeneidad respecto a la corriente del gas y sólo se pueden remover mediante difusión hacia superficies controladas donde se absorben de manera preferencial o, en algunos casos, presentan una modificación química para transformarse en productos menos nocivos.

Por lo general, las concentraciones de contaminantes gaseosos en la mezclas de gas son relativamente bajas. La reducción de dichas sustancias a niveles deseables se lleva a cabo principalmente mediante dos métodos:

- Los contaminantes pueden ser absorbidos por solventes líquidos(Ver Cuadro III.1).
- El contaminantes se puede oxidar por medio de la incineración catalítica o de flama directa (Ver Cuadro III.1).

Cuadro III.1
Clasificación General de los Dispositivos de control de Gases

DISPOSITIVO	PRINCIPIO UTILIZADO
Dispositivos de incineración y combustión	Se aplica el tratamiento de los contaminantes del aire mediante su oxidación, la cual se logra mediante una premezcla con algún combustible.
Torres empacadas	Se utiliza el principio de adsorción , el cual es un proceso de transferencia de masa en el cual el gas se disuelve en el líquido.

El método elegido para la separación de gases depende de varios factores que podemos agrupar de acuerdo a su naturaleza (Ver Cuadro III.2):

Cuadro III.2 Parámetros de Diseño

ELEMENTOS	PARAMETROS :
NATURALEZA DE LA FUENTE	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Descarga: <ul style="list-style-type: none"> o Continua o Discontinua <input type="checkbox"/> Temperatura de entrada de gases al proceso <input type="checkbox"/> Temperatura de salida del proceso <input type="checkbox"/> Procesos y reacciones dentro de la fuente fija <input type="checkbox"/> Cantidad descargada
Gases	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Densidad <input type="checkbox"/> Composición química <input type="checkbox"/> Conductividad eléctrica <input type="checkbox"/> Temperatura de Autoignición <input type="checkbox"/> Tiempo de residencia en el dispositivo <input type="checkbox"/> Límites de explosividad
EQUIPO DE REMOCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Tamaño, ubicación y dimensiones <input type="checkbox"/> Eficiencia del equipo <input type="checkbox"/> Aspectos constructivos <input type="checkbox"/> Principios de diseño <input type="checkbox"/> Aspectos de mantenimiento <input type="checkbox"/> Durabilidad <input type="checkbox"/> Localización
GAS TRANSPORTADOR	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Temperatura <input type="checkbox"/> Conductividad eléctrica <input type="checkbox"/> Composición química

III.2 Dispositivos de incineración y combustión

III.2.1 Aspectos Generales

La incineración o combustión auxiliar es un proceso de combustión que se utiliza para remover contaminantes combustibles del aire (gases, vapores u olores). Se usa frecuentemente en situaciones donde el gasto volumétrico del gas residual de un proceso es grande, pero el nivel de gas contaminante es pequeño. (Figura III.1).

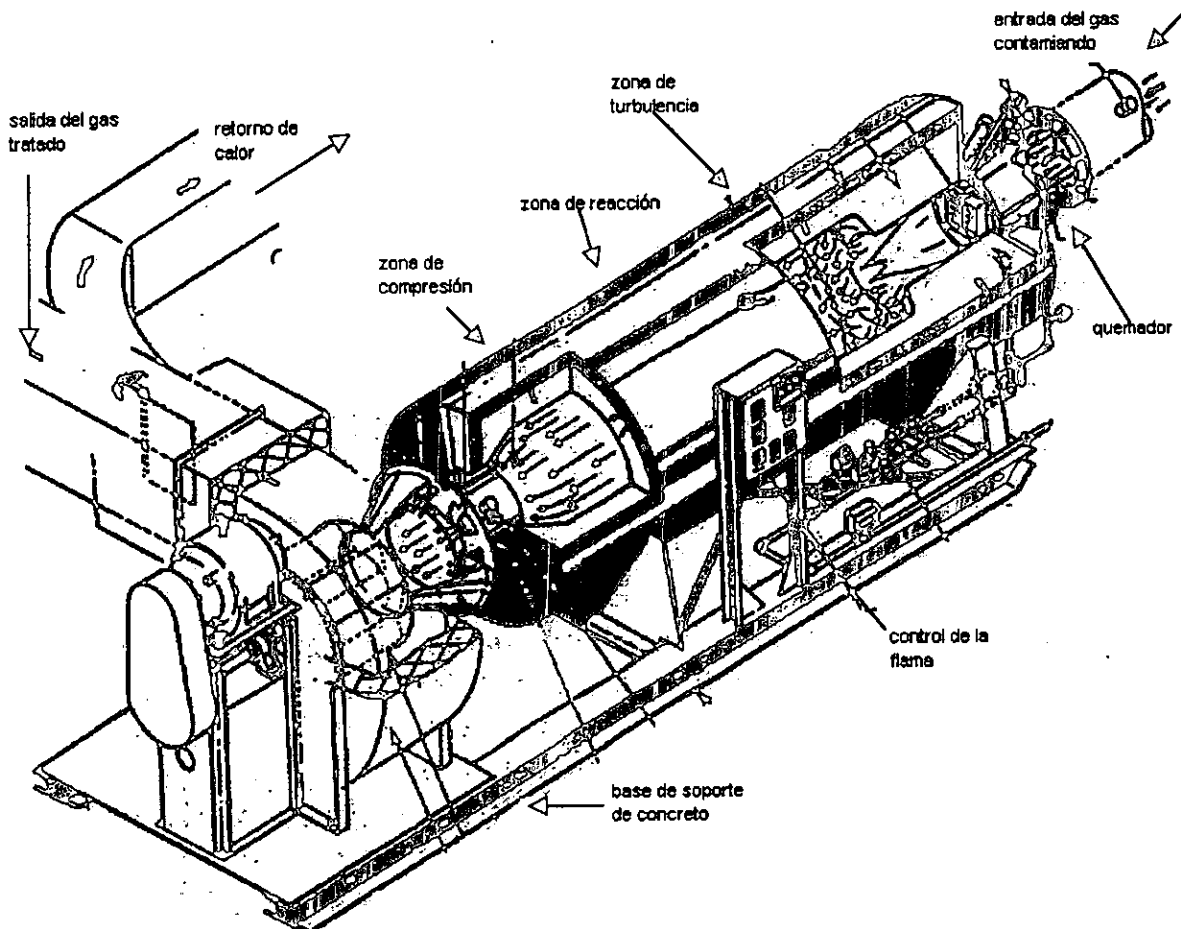


Figura III.1 Partes principales de un incinerador

La Figura III.2 muestra la ruta que recorre el gas dentro del incinerador.

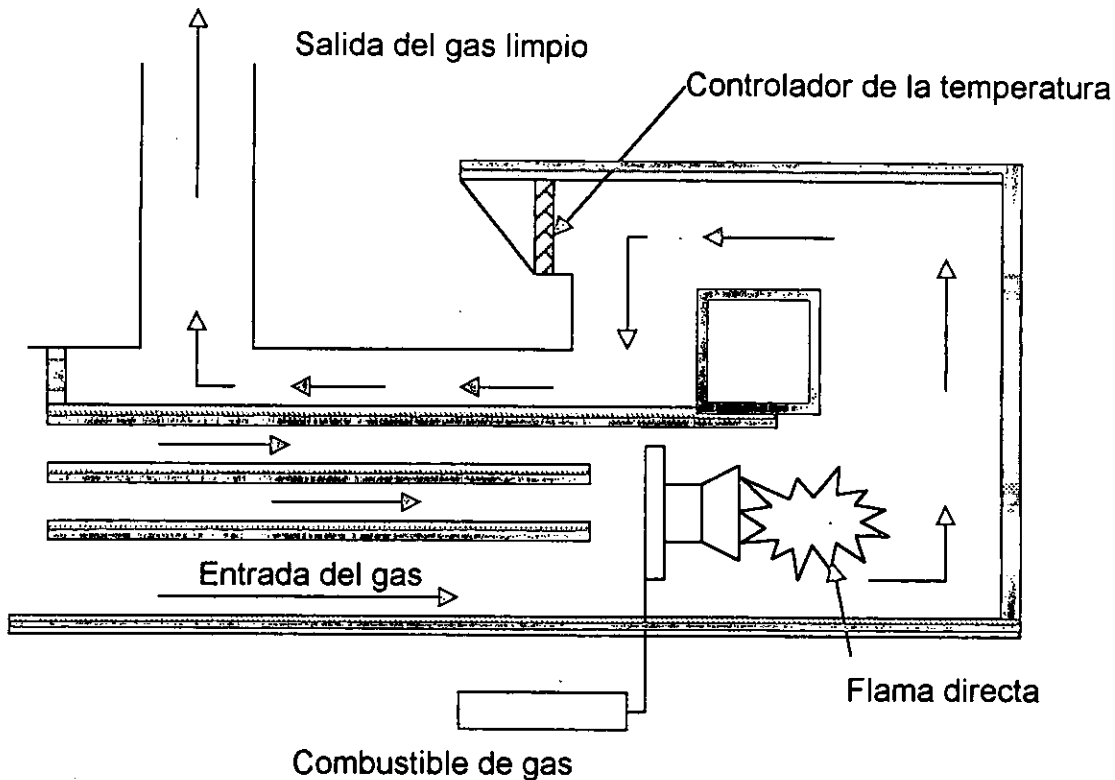


Figura III.2 Vista en perfil de un Incinerador

La incineración de residuos gaseosos indeseables es un método satisfactorio de control de contaminantes, desde diversos aspectos :

Casi todos los contaminantes altamente olorosos son combustibles o son cambiados químicamente a sustancias menos olorosas cuando se calienta suficientemente en la presencia del oxígeno. Entre los contaminantes olorosos del aire, destruidos por la incineración, se incluyen los mercaptanos, los gases del cianuro y del ácido sulfhídrico.

Los aerosoles orgánicos que causan plumas visibles se destruyen eficazmente por la combustión auxiliar. Los tostadores de café, las casas para el ahumado de carne, y las estufas de horneado de los esmaltes, emiten tales aerosoles.

La Figura III.2 muestra la ruta que recorre el gas dentro del incinerador.

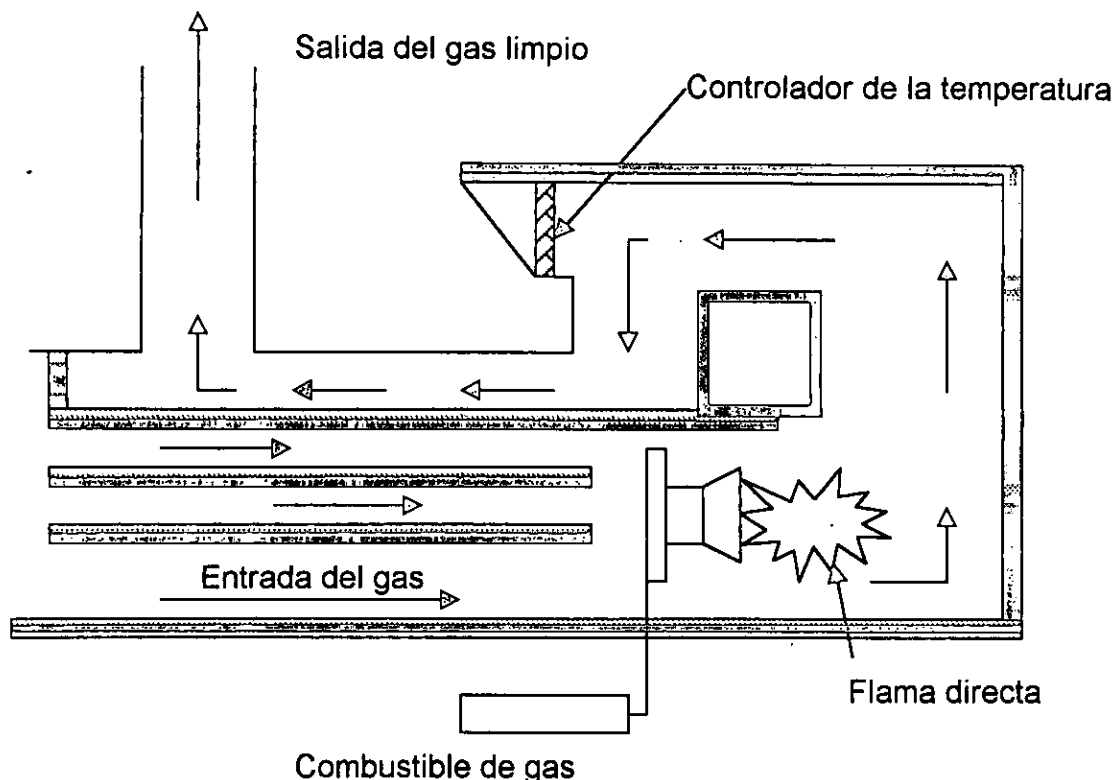
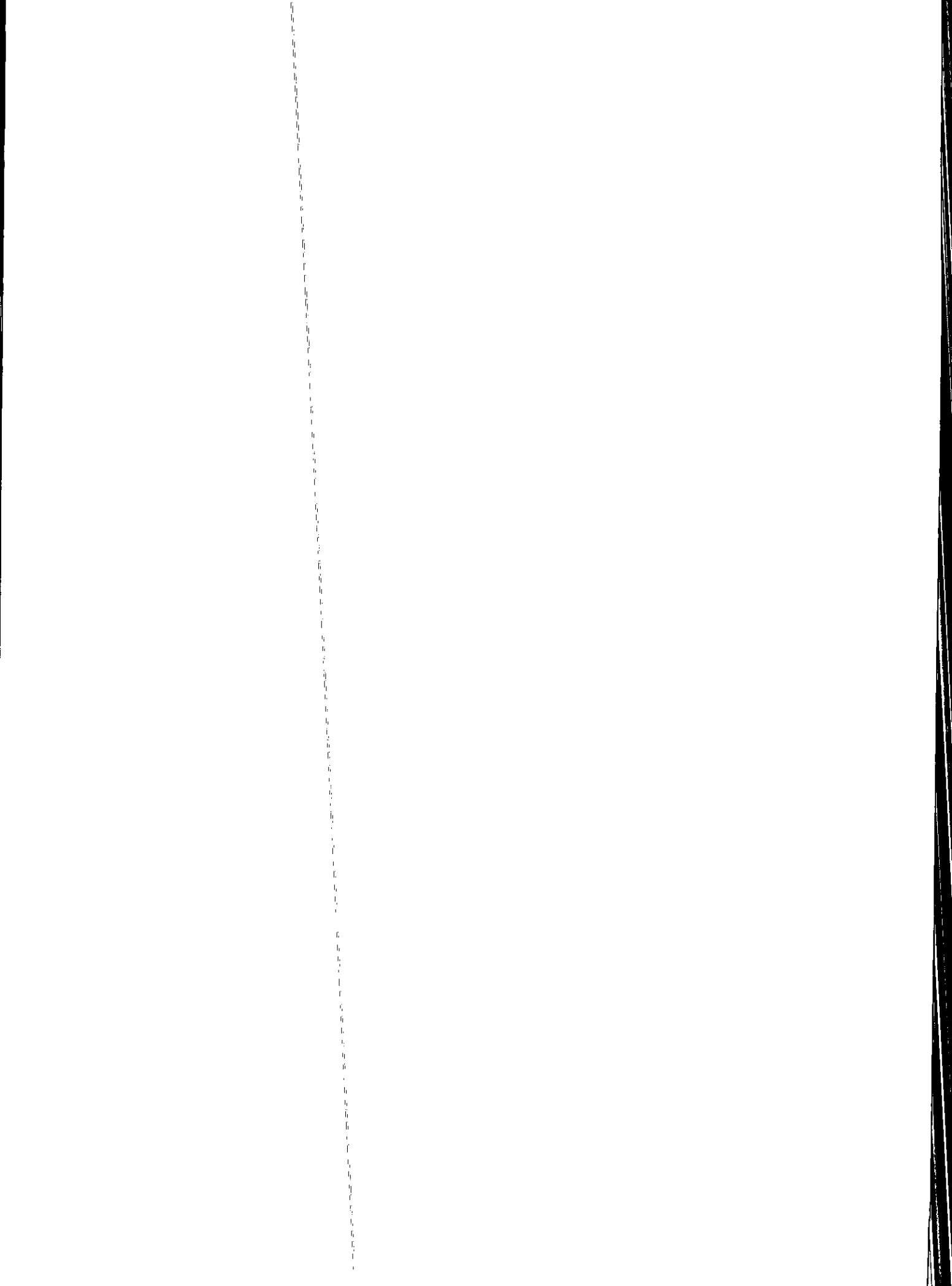


Figura III.2 Vista en perfil de un Incinerador

La incineración de residuos gaseosos indeseables es un método satisfactorio de control de contaminantes, desde diversos aspectos :

Casi todos los contaminantes altamente olorosos son combustibles o son cambiados químicamente a sustancias menos olorosas cuando se calienta suficientemente en la presencia del oxígeno. Entre los contaminantes olorosos del aire, destruidos por la incineración, se incluyen los mercaptanos, los gases del cianuro y del ácido sulfhídrico.

Los aerosoles orgánicos que causan plumas visibles se destruyen eficazmente por la combustión auxiliar. Los tostadores de café, las casas para el ahumado de carne, y las estufas de horneado de los esmaltes, emiten tales aerosoles.



Ciertos gases y vapores orgánicos, si se descargan en la atmósfera, intervienen en reacciones químicas. La combustión auxiliar con flama destruye eficazmente dichos materiales. Algunas industrias, como las refinerías, producen grandes cantidades de gases residuales altamente combustibles y materiales orgánicos que serian de otra manera peligrosos. Por lo general el método mas seguro de control del efluente es mediante la combustión en chimeneas de flama, u hornos especialmente diseñados.

Las **ventajas** de la combustión auxiliar son múltiples :

- ◊ Destrucción esencialmente completa de todos los contaminantes combustibles, cuando el equipo esté diseñando y operado de manera adecuada.
- ◊ Posibilidad de adaptar el equipo a cambios moderados en el gasto y concentración del efluente.
- ◊ Una eficiencia de control que sea relativamente insensible al contaminante gaseoso específico,
- ◊ Ausencia del deterioro en el funcionamiento.
- ◊ Posibilidad de recuperación económica del calor residual.

Entre las **desventajas** frecuentemente citadas se tienen:

- ◊ Costos de inversión y operación razonablemente altos.
- ◊ La necesidad de proveer en algunos casos equipos de colección y conducción, lo que añade significativamente al costo.
- ◊ La posibilidad de introducir problemas especiales de contaminación cuando estén presentes en el hidrocarburo otros átomos diferentes de C, H y O.

Como ejemplo de este último problema se tienen los compuestos que contienen cloro, nitrógeno y azufre. En estos casos, los productos de la incineración podrán requerir tratamiento adicional, como por ejemplo el lavado, y podrán presentarse problemas de corrosión. Además, el tipo catalítico de quemador auxiliar puede producir compuestos que envenenen el lecho catalizador, o que causen el bloqueo del quemador. En los quemadores auxiliares térmicos y catalíticos, es necesario suministrar combustible adicional a fin de alcanzar el nivel deseado de temperatura para la oxidación de los contaminantes del gas residual.

Es necesario conocer diversos factores para poder diseñar un proceso de incineración para los contaminantes gaseosos. Se incluyen la composición química de los contaminantes y su nivel de concentración, la temperatura del gas residual a la entrada, el gasto volumétrico del gas residual por manipular, y los niveles permisibles de emisión para los contaminantes.

Los tres tipos básicos de incineración se clasifican como

- 1) de flama directa,
- 2) térmico
- 3) catalítico.

Incineración por Flama directa

El diseño de los quemadores auxiliares de flama directa para la incineración de gases y vapores combustibles, requiere el conocimiento de los límites explosivos o de flamabilidad tanto de los materiales residuales como del gas combustible en las mezclas con el aire. Dichos conocimientos demostrarán si es posible que un gas residual dado podrá mantener la combustión sin tener que recurrir al enriquecimiento adicional de combustibles. Se deberá observar que una mezcla de material combustible con el aire es explosiva dentro de ciertos límites. La reacción es mas violenta cuando la mezcla es ligeramente rica en combustible. Las concentraciones de combustible en el lado rico y pobre de la mezcla, mas allá de las cuales no se propagará la flama se conocen como los límites de flamabilidad baja y alta (Ver Cuadro III.3)

Cuadro III.3 Límites de Flamabilidad

Gas	Límites en % del volumen total	
	Inferior	Superior
Hidrógeno	4	75
Acido Sulfhídrico	4.3	45
Monóxido de carbono	12.5	74
Gas natural	4.8	13.5
Gasolina	1.4	7.6
Eter	1.9	48
Eter mercaptano	2.8	18

La incineración por flama directa, es un método por el cual los gases residuales se queman directamente en una combustión, con o sin la adición de combustible adicional, como el gas natural. En algunos casos, el gas residual mismo puede constituir una mezcla combustible sin que haya que añadir aire. En otras situaciones, aun después de la adición de aire la mezcla estará dentro de sus límites de flamabilidad. Si la mezcla queda fuera de su límite de flamabilidad inferior, la adición de una cantidad relativamente pequeña de combustible la llevara frecuentemente dentro del límite. En un quemador bien diseñado, será posible quemar un gas residual.

Incineración Catalítica

La incineración térmica se utiliza con preferencia a la incineración por flama directa cuando los materiales combustibles en un gas residual tienen una concentración muy baja. El quemador auxiliar catalítico es un método que compite, con el quemador auxiliar térmico. Un catalizador acelera la tasa de una reacción química sin que él experimente un cambio químico. Por tanto, los tiempos de residencia requeridos para las unidades catalíticas son mucho menores que los requeridos para las unidades térmicas. En lugar de los tiempos de residencia o detención de 0.3 a 0.9 seg., típicos de las unidades térmicas, los requerimientos de tiempo para la acción catalítica son del orden de unas pocas centésimas de segundo. Los quemadores auxiliares térmicos pueden requerir de 20 a 50 veces el tiempo de residencia que requiere una unidad catalítica.

Para una unidad catalítica se habla de la "velocidad especial" en lugar del tiempo de residencia. La velocidad especial se define como los pies cúbicos normales por hora de flujo de gas divididos por el volumen, en pies cúbicos, del catalizador.

La otra ventaja marcada de las unidades catalíticas para su uso en un proceso de incineración consiste en que se baja la temperatura de ignición. En realidad, esto es un efecto energético. Un catalizador reduce los requerimientos de energía del proceso de oxidación que ocurre en una instalación catalítica, opuesto a la situación necesaria para una región homogénea en la fase gaseosa. Por tanto, no hay que calentar la corriente de gas residual a una temperatura tan alta como en la incineración térmica. Si se hacen pasar los gases residuales a través del lecho del catalizador se puede reducir hasta en 500°F la temperatura necesaria para la reacción exotérmica con el oxígeno de los gases y vapores orgánicos, si se le compara con la incineración térmica.

La mayoría de los gases residuales que contienen contaminantes combustibles, procedentes de procesos industriales, están a una temperatura bastante baja. Por tanto, se utiliza algún tipo de quemador de precalentamiento para llevar el gas residual hasta la temperatura en la que el catalizador será efectivo.

Son típicas las temperaturas de 600 a 1000° F (590°a 810° K). Este intervalo de temperatura es inferior a la temperatura de autoignición para la incineración térmica de manera que los combustibles en el gas residual se calientan. Las reacciones de combustión ocurren en la superficie del catalizador. No se observa ninguna estructura directa de la flama, pero la superficie del catalizador estará incandescente. La eficiencia de la combustión catalítica es del orden del 95 al 98%, de modo que los gases efluentes de la conversión catalítica estarán constituidos principalmente por dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno.

Muchas sustancias tienen propiedades catalíticas, pero solo pocas son las que se usan en el tratamiento de los gases residuales. Para que pueda ser provechosa en el control de la contaminación del aire, la sustancia debe ser relativamente barata, de larga duración, capaz de funcionar a la temperatura requerida y susceptible de ser conformado en una variedad de perfiles.

Uno de los problemas que se presentan en la incineración por flama directa, es que son posibles temperaturas de la flama en el intervalo de los 2500°F. Esto da por resultado la formación de óxidos de nitrógeno cuando este disponible un suficiente exceso de aire, y se mantenga un tiempo suficiente la alta temperatura del gas. De esta manera, el proceso de combustión podría sustituir simplemente un tipo de contaminante por otro

La antorcha se utiliza en primer lugar para combustibles gaseosos que no se pueden eliminar convenientemente por otros medios. Por lo general, requiere un piloto para asegurar la combustión continua. Dicha cámara de combustión se debe diseñar de manera tal que la flama se mantenga a diversos gastos de gas, velocidades del viento y composición.

Incineración Térmica

Cuando la concentración de los contaminantes combustibles sea muy baja será necesario usar otros medios para convertir los combustibles. Uno de estos métodos es la incineración térmica.

La corriente de gas residual se precalienta por la zona de combustión de un quemador, provisto con combustible suplementario por lo que los combustibles en la corriente de gas residual se llevan por encima de sus temperaturas de autoencendido y se queman con el oxígeno usualmente presente en la corriente contaminada. Si no se dispone normalmente de suficiente oxígeno, se añade al flujo de gas residual por medio de un soplador o un ventilador. La principal ventaja del proceso es que la incineración térmica se lleva a cabo característicamente con temperaturas dentro del intervalo de 1000 a 1500°F. Este intervalo de temperatura hace menos costoso el diseño de la cámara de combustión, y atenúa la posibilidad de una formación apreciable de los óxidos de nitrógeno.

Una consideración en el diseño de los incineradores térmicos esta representada por las "tres Tés" de la combustión, a saber, tiempo, temperatura y turbulencia. El tiempo de residencia en el incinerador deberá ser suficiente para permitir una completa combustión del material combustible. Normalmente se encuentra dentro del intervalo de 0.2 a 0.8 s, con 0.5 s como una pauta razonable. La turbulencia se refiere a la cantidad requerida de mezclado mecánico a fin de asegurar el completo contacto del oxígeno con el combustible, y de los contaminantes combustibles con los productos de combustión y el calor de la flama.

Un mezclado completo es usualmente más importante en el control de los olores que en el control general de los hidrocarburos, debido a que el escape del compuesto odorífero en concentraciones de sólo unas pocas partes por billón, se puede frecuentemente detectar. Se requerirá menos tiempo de residencia cuando ocurra un mezclado adecuado y se utilice una flama corta. Un aumento de una o las tres cantidades aumentará la posibilidad de una remoción razonablemente completa de los productos residuales combustibles. Una disminución en los factores requerirá un aumento de uno o ambos de los factores restantes, a fin de mantener el mismo nivel de remoción del contaminante.

Un aumento en la turbulencia, por el apropiado diseño del quemador y los ductos, es en general la alteración mas fácil y barata de un sistema de combustión. Un aumento en la eficiencia de combustión a través de un aumento en el tiempo de residencia será apropiado solamente hasta un cierto grado, puesto que un tiempo mas largo significa un mayor quemador auxiliar. Por tanto, los costos iniciales podrían aumentar apreciablemente.

Las temperaturas de operación usadas en los quemadores auxiliares varían con la naturaleza de los contaminantes combustibles presentes en el gas efluente. Estos contaminantes pueden ser hidrocarburos en general, monóxido de carbono, olores, o una combinación de varios de ellos, (Ver Cuadro III.4).

Cuadro III.4 Intervalos de temperaturas de operación.

Intervalo promedio de temperaturas (°K)	
Oxidación de los hidrocarburos	950-1400
Oxidación del Monóxido de carbono	1250-1450
Control de los olores por la vía de la oxidación	900-1300

III.2.1 Diseño

El diseño de los incineradores depende principalmente de las características particulares de cada aplicación, por lo que las expresiones de diseño se fijan a partir de la aplicación del siguiente cuestionario

Cuestionario de diseño de incineradores :

Nombre: _____ Fecha : _____

Nombre de la compañía: _____

Dirección: _____

Ciudad:/estado/Z.P.: _____

Teléfono/ Fax: _____

Descripción del proceso: _____

¿Cuál es el problema ?:	límite	objetivo
Compuestos volátiles	_____	_____
Hidrocarburos	_____	_____
Olores	_____	_____
Partículas	_____	_____
Compuestos Tóxicos	_____	_____

Cuestionario de diseño de incineradores :

Proceso de emisión de gases			
	% de emisión	Temperatura de emisión	Presión de salida (" H ₂ O)
Máxima emisión :			
Mínima emisión:			
Estándar:			

Contaminante	Gasto Lb/Hr.	comentarios

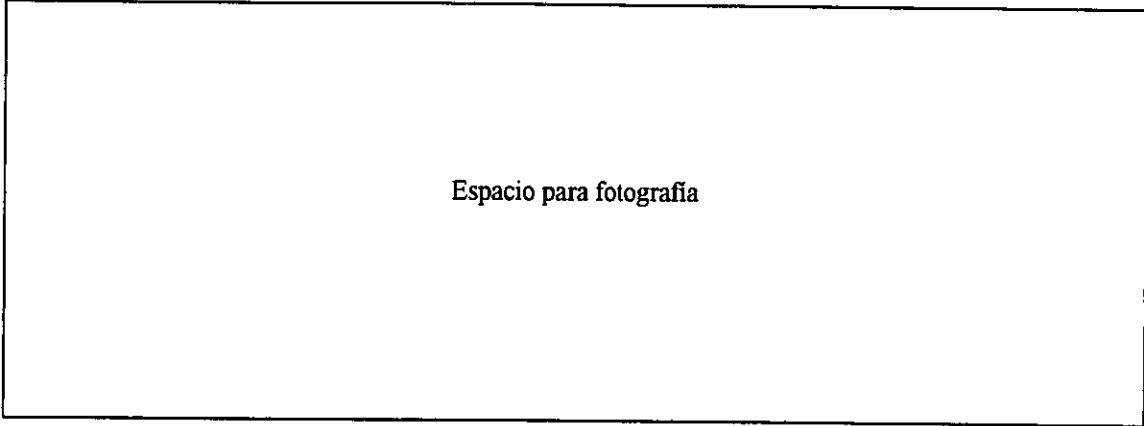
¿Desea recuperar parte del calor generado? _____

¿Desea recuperar el calor durante el proceso de incineración ? _____

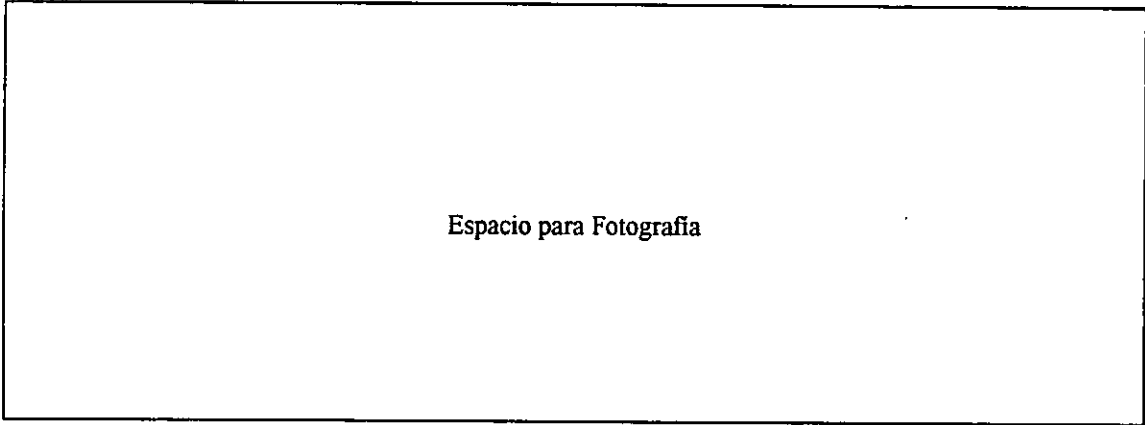
¿Piensa que el implementar el equipo reducirá la eficiencia de producción ? _____

¿Desea la ayuda de Ingenieros Especializados ? _____

Cuestionario de diseño de incineradores :



Espacio para fotografia



Espacio para Fotografia

Con base en el cuestionario anterior se establecen los tres principales parámetros de diseño de dispositivos de incineración convencionales :

- **Temperatura** – empíricamente se puede establecer la temperatura a la cual se debe mantener el incinerador mediante la siguiente ecuación :

$$T[°F] = \text{temperatura de autoignición} + 300 \text{ °F}$$

Ec.1

Cuadro III.5 Temperaturas de autoignición

Substancia	Temperatura de Autoignición [°F]
Acetona	1000
Ethanol	799
Benceno	1075
Hidrógeno	1076
Hexano	820
Ethileno	842
Propano	851
Tolueno	1026
Propyleno	851
Isobutano	950
Fenol	1319
Butano	896
Monóxido de carbono	1205
Amonio	1200

La temperatura de autoignición, es la temperatura a la cual el combustible mezclado con aire en el interior del incinerador, inicia una reacción, sin necesidad de una ayuda externa (flama directa), (Ver Cuadro III.5).

◦ **Tiempo de residencia:**

$$\text{Tiempo de residencia (Tr)} = \frac{V}{Q} = \frac{L}{u} \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

V = Volumen de la zona de reacción {m³}.

Q = volumen del gas contaminado {m³/s}.

L = largo de la zona de reacción {m}.

u = velocidad de entrada del gas {m/s}.

◦ **Tiempo de mezclado del gas contaminado con el combustible.**

$$\text{Tiempo de mezclado (Tm)} = \frac{L^2}{D} \quad \text{Ec.3}$$

Donde :

L = Largo de la zona de reacción {m}.

D = coeficiente de difusión dentro de la zona de reacción {m²/s}.

Un parámetro empírico que establece la eficiencia que se esta logrando en los dispositivos de incineración es:

$$\eta = 1 - \frac{V_o}{V_i} = 1 - e^{-kTr} \quad \text{Ec.4}$$

donde :

V_o = Volumen de contaminante tratado en la entrada del incinerador {m³}

V_i = Volumen de contaminante tratado en la salida del incinerador {m³}

k = Parámetro que depende de las características del incinerador

III.2.3 Especificaciones y construcción :

SISTEMAS DE INCINERACION PYROTECHNIX

Los sistemas de incineración producidos por esta empresa se muestran en el Cuadro III.6.

Cuadro III.6 Sistemas de incineración Pyrotechnix

Modelo Estándar	Capacidad por hora de gases	
	Kg.	Lbs.
HL 500	230	500
HL 1500	680	1500
HL 3000	1360	3000
HL 5000	2270	5000
HL 6000	2720	6000
HL 7000	3175	7000
HL 8000	3630	8000
HL 10000	4540	10000

MODELO HL3000 PYROTECHNIX

Este modelo de incinerador esta diseñado para procesar **1360 kg/hr**, este es un modelo convencional, con una unidad de flama directa de **3600 kcal/kg**, presenta dos entradas para el gas contaminado e incluye una rampa hidráulica para la remoción de contaminantes (Figura III.2)

El sistema se basa en la construcción por bloques, lo cual facilita que su mantenimiento sea poco costoso, pues no se necesita remover el equipo completo. Las especificaciones de construcción se muestran en el Cuadro III.7.

Cuadro III.7 Especificaciones del modelo HL3000

Especificaciones de Construcción	
Peso	91 ton.
Plantilla de concreto	Alto = 0.15 m.
$f'c \geq 150 \text{ kg/cm}^2$	Ancho = 6.1 m
	Largo = 10.7 m

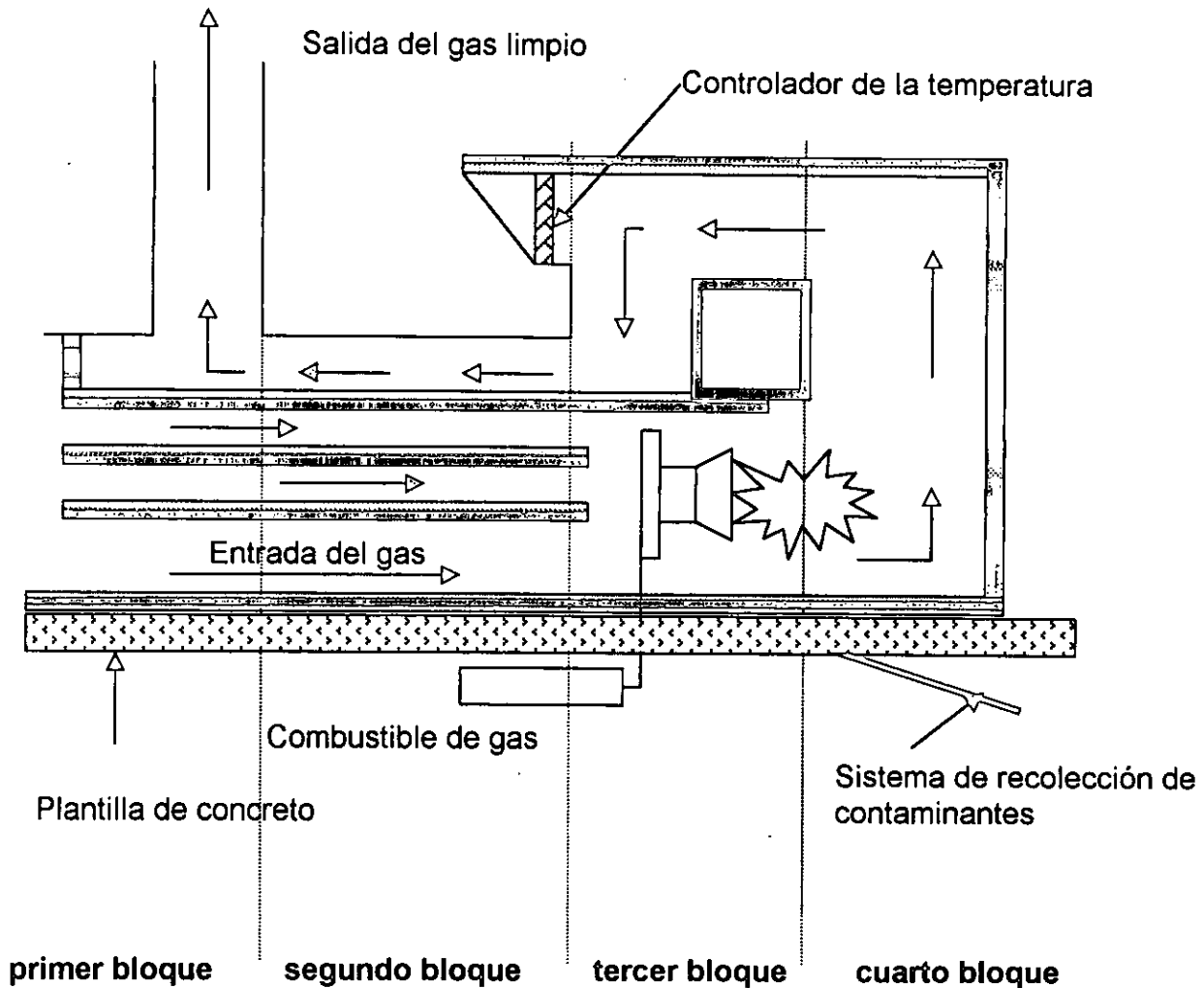


Figura III.3 Bloques que constituyen un incinerador

MODELO HL5000 PYROTECHNIX

Este modelo de incinerador está diseñado para procesar **2270 kg/hr**, este es un modelo convencional, con una unidad de flama directa de **3600 kcal/kg**, presenta dos entradas para el gas contaminado e incluye una rampa hidráulica para la remoción de contaminantes (Figura III.3)

El sistema se basa en la construcción por bloques, controla automáticamente la entrada del aire necesario para la combustión, las especificaciones de construcción se muestran en el Cuadro III.8.

Cuadro III.8 Especificaciones del modelo HL5000

Especificaciones de construcción	
Peso	136 ton.
Plantilla de concreto	Alto = 0.15 m.
$f'c \geq 150 \text{ kg/cm}^2$	Ancho = 15.2 m
	Largo = 15.2 m

El sistema cuenta con dos compartimentos de combustión y con dos recolectores de contaminantes, las cuales pueden operar simultáneamente a diferentes temperaturas, para la salida de los gases de combustión, se cuenta directamente con una chimenea de 40 pulgadas de diámetro, la cual se extiende hasta una altura de 7.80 m.

Modelo Thermostack

Este modelo de incinerador esta diseñado para procesar **680 kg/hr**, este es un modelo convencional, con una unidad de flama directa de **1600 kcal/kg**, no incluye rampa hidráulica para la remoción de contaminantes.

Su principal característica, es que se puede utilizar en fábricas pequeñas, las especificaciones de construcción se muestran en el Cuadro III.9.

Cuadro III.9 Especificaciones del modelo HL3000

Especificaciones de construcción	
Peso	61 ton.
Plantilla de concreto	Alto = 0.15 m.
$f'c \geq 150 \text{ kg/cm}^2$	Ancho = 6.1 m
	Largo = 7.6 m

Puede ser utilizado eficientemente durante dos años sin la necesidad de mantenimiento mayor.

Para su diseño se siguen las recomendaciones propuestas por la USEPA

- el promedio descargado de CO (monóxido de carbono) en diferentes pruebas fue de :

0.77 kg/hr (1.56 lbs/hr). Esto es comparado con lo provisto por otro tipo de incineradores que en promedio emiten **13.60 kg/hr** (36.00 lbs/hr.).

III.3.4 Fabricantes

Nombre de la empresa	Aplicaciones	Página WEB
Dragon Trenchburning	Empresa dedicada al diseño de incineradores, cumpliendo con las normas existentes de cada lugar.	http://www.perfecthit.com/dragon/trenchburning.htm
CAE Combustion/Incineration Services.	Se especializa en el mantenimiento preventivo de incineradores de uso continuo	http://www.interaccess.com/welcome/services/infocombu
TRENCH BURNERS AND SELF-CONTAINED REFRACTORY WALLED SYSTEMS.	Especialista en la instalación de incineradores en el extranjero, ya que cuenta con la capacidad de transporte e instalación necesarias	http://www.perfecthit.com/air-burners
JTC INC. ENVIRONMENTAL APLICATION	Especialista en la operación de incineradores	http://www.jtcusa.com/environmental_division.html
CVM corporation 402 Vandever Avenue Wilmington, Delaware # 19802 Tel : (302)654-7070 Fax: (302)6542772	Especialista en la industria textil, automotriz, metálica y del acero - ofrece una eficiencia entre el 95-99% sus refacciones son durables y pueden limpiarse manualmente.	
Micro air -pollution Filtertechnik P.O. Box 4569, Central Avenue Westfield NJ 045899-06654 Tel (908) 222-4200	Empresa fundada en 1950 con amplia experiencia en proyectos llave en mano (construcción y operación), para el control de emisiones contaminantes.	

III.2.5 Ejemplo del diseño de un Dispositivo de Incineración

Estimar la temperatura requerida en la cámara de un incinerador para un tiempo de residencia de 0.5 seg., para obtener un 99.5 % de eliminación de tolueno.

Como primer tanteo, obtenemos de la (Ec.1) una aproximación :

$$T[{}^{\circ}\text{F}] = \text{temperatura de autoignición} + 300 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$T[{}^{\circ}\text{F}] = 1026 \text{ }^{\circ}\text{F} + 300 \text{ }^{\circ}\text{F} = 1326 \text{ }^{\circ}\text{F}.$$

Donde la Temperatura de autoignición se obtiene del Cuadro III.5 (para el Tolueno es de 1026°C)

Utilizando un modelo HL3000 PYROTECHNIX, que trabaja a una temperatura de 1360°F.

Se tiene un tiempo de residencia igual a 0.5 seg. y el largo del modelo propuesto es de 10.7 m.

$$\text{Tiempo de residencia (Tr)} = \frac{L}{u} \tag{Ec.2}$$

Donde:

L = Largo de la zona de reacción {m}.

u = velocidad de entrada del gas {m/s}.

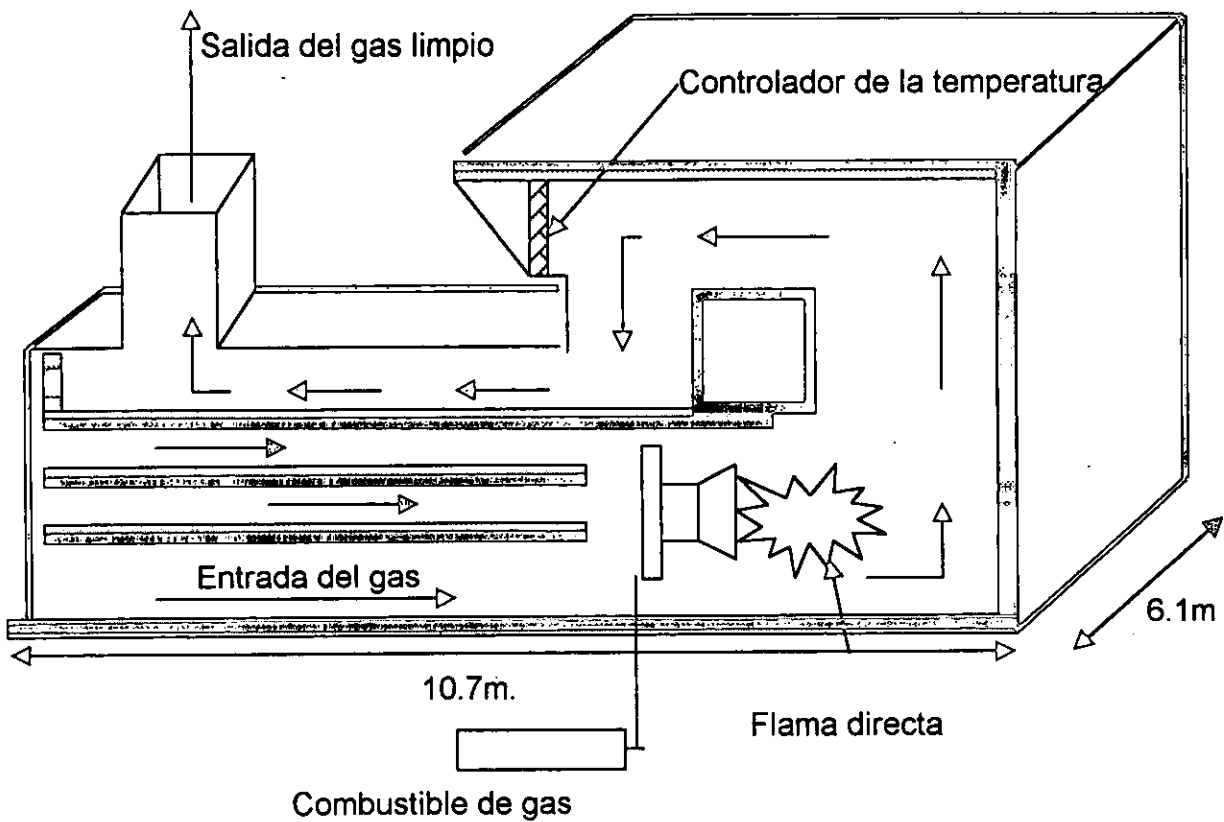
Así, la velocidad de entrada del gas al incinerador será :

$$u = 10.7\text{m} / 0.5 \text{ seg} = 21.4 \text{ m/s}$$

Se debe aplicar el cuestionario propuesto para conocer las características de operación a las que se sujetará el incinerador.

Así las características que debe presentar el equipo son:

Especificaciones de Construcción	
Peso	91 ton.
Plantilla de concreto	Alto = 0.15 m.
$f'c \geq 150 \text{ kg/cm}^2$	Ancho = 6.1 m
	Largo = 10.7 m



Vista en perfil de un Incinerador HL 3000

III.3 Torres empacadas

III.3.1 Aspectos Generales

Las torres empacadas utilizan un proceso de separación llamado **adsorción** que se basa en la capacidad que tienen ciertos sólidos para remover en forma preferencial, componentes gaseosos (o líquidos) de una corriente. Las moléculas del gas o vapor contaminantes, presentes en una corriente residual, se acumulan en la superficie del material sólido. Al medio absorbente sólido (o líquido) se le llama **absorbente**, mientras que el gas o vapor absorbido se le llama **adsorbato**, (Ver Figura III.4).

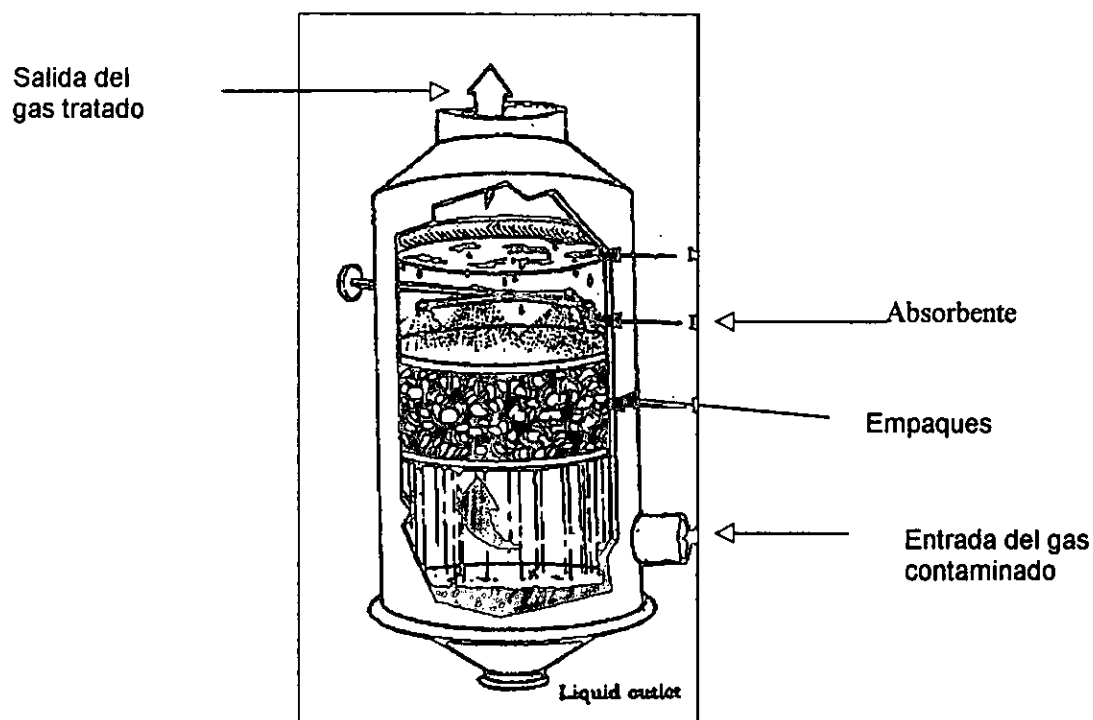


Figura III.4 Torre empacada convencional

La **adsorción** es útil en los casos que :

- ◊ El gas contaminante no es combustible o es, difícil de quemar.
- ◊ El contaminante es lo suficientemente valioso para justificar su recuperación.
- ◊ El contaminante se encuentra en una concentración muy diluida en el sistema de escape.

La adsorción hace también posible económicamente purificar gases que contienen solo pequeñas cantidades de contaminantes, que resultan difíciles de purificar por otros medios.

El proceso de adsorción se clasifica en :

Adsorción física - Las moléculas de gas se adhieren a la superficie del absorbente sólido como resultado de las fuerzas atractivas intermoleculares entre ellas (fuerzas de van der Waals). El proceso de adsorción es exotérmico. La ventaja de la adsorción física se apoya en el hecho de que el proceso es reversible. Al bajar la presión del adsorbato en la corriente de gas, o elevando la temperatura, el gas absorbido es fácilmente desadsorbado sin cambio en la composición química.

Adsorción química - Es el resultado de una interacción entre el adsorbato y el medio absorbente por medio de fuerzas de van der Waals. La fuerza de unión asociada con este tipo de adsorción es mucho mas fuerte que en la adsorción física. Por tanto, el calor liberado durante la adsorción química es mucho mayor que el liberado durante la adsorción física.

El propio absorbente deberá tener las siguientes propiedades:

- El diámetro de las partículas puede variar desde 0.5 pulgadas hasta valores tan bajos como 200 μm o menos.
- Es esencial una gran área de superficie por unidad de peso.
- Para la adsorción del gas, no es importante la superficie exterior aparente, sino mas bien la superficie suministrada por los poros internos del sólido. Cuando el diámetro efectivo del poro es menor que el diámetro molecular del gas que se considera, estará entonces disponible una enorme área superficial para la adsorción.

Si las moléculas son pequeñas, se pueden absorber sobre sólidos tales como sílice gelatinoso o alúmina, ya que estos sólidos consisten en una multiplicidad de poros diminutos, los cuales incrementan de manera considerable la superficie de exposición disponible.

Por ejemplo, la superficie de exposición efectiva del sílice gelatinoso es del orden de varios metros cuadrados por cada gramo de absorbente. Los absorbentes sólidos de este tipo se puede reutilizar .

Si se trata de moleculares grandes (compuestos orgánicos), el absorbente mas adecuado es el carbón activado. Este es carbón de leña que se prepara mediante destilación destructiva de la madera, cáscara de coco y comprimidos de carbón, el cual se ha tratado (activado) con vapor y algunos reactivos químicos inorgánicos. La superficie de exposición interna total de este material es mucho mas grande que la del sílice gelatinoso y puede fluctuar desde cerca de 200 hasta 1200 m² por gramo. Por esto, el carbón activado puede actuar como absorbente para olores durante periodos de semanas o aun meses sin necesidad de reemplazo o regeneración; se puede regenerar mediante calentamiento a 650°C en una atmósfera inerte no oxidante durante varias horas, y reactivar en forma subsecuente.

Tipos de Absorbentes

Existen dos tipos de absorbentes que se utilizan en la construcción de torres empacadas:

Absorbente líquido En los sistemas que utilizan este absorbente, el líquido se remueve de manera continua y la superficie se regenera conforme el líquido fluye dentro del empaquetamiento de la torre.

Absorbente Sólido- En los sistemas que utilizan este absorbente, el sólido mismo se tiene que renovar cuando se agota, y esto es lo mas efectivo en sistemas de repuesto. Cuando se utiliza la renovación continua de sólidos, se tiende hacia la deterioración del sólido absorbente por rozadura en su colocación.

El control de las fuentes de contaminantes gaseosos con torres empacadas, implica poner en contacto el gas efluente impuro con el líquido limpiador y separar posteriormente el gas limpio del líquido contaminado. En el proceso de limpieza, el gas contaminante es absorbido por el líquido de limpieza. La absorción es una operación básica conocida como **lavado**.

Las torres empacadas, deberán permitir un total contacto entre el gas y el líquido solvente, por lo que se deben diseñar para tener grandes áreas superficiales del líquido con un mínimo de caída de presión del gas. El contacto entre el líquido y el gas se puede llevar a cabo por dispersión del líquido en el gas, o viceversa.

La distribución de una torre empacada se muestra en la Figura III.5. El gas con impurezas entra por la parte inferior y el gas limpio sale por la parte superior de la torre. El líquido limpio entra por la parte superior de la torre y se extrae por la parte inferior. El gas limpio se descarga a la atmósfera a través de una chimenea. El líquido que sale del absorbedor se puede separar del gas contaminante, y recircularlo.

El material de empaque (químicamente inerte) permite aumentar el área superficial de la película de líquido; por lo que se dispone de una variedad de perfiles geométricos, cada uno de ellos con un área superficial única y su correspondiente caída de presión del gas.

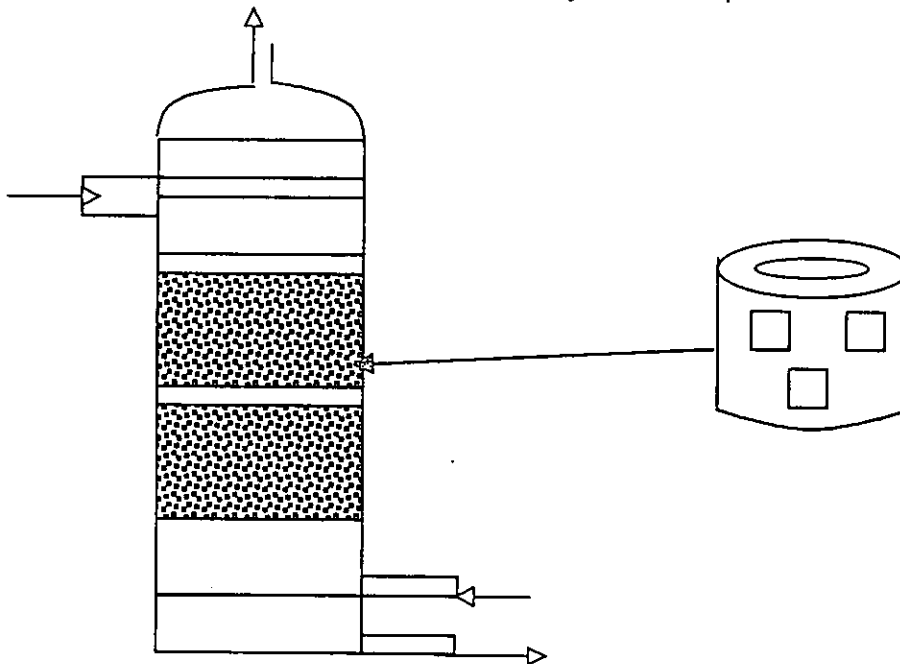


Figura III.5 Distribución de una torre empacada

Así, la remoción de los contaminantes de la corriente se lleva a cabo en tres pasos :

- Difusión del gas contaminado sobre la superficie del absorbente.
- Disolución del gas en el absorbente (transferencia a través de la interface gas / líquido).
- Separación del contaminante.

III.3.2 DISEÑO

Balance de Masa

Para determinar las características de operación de una torre empacada de absorción, es necesario realizar un balance de masa sobre el proceso de transferencia. La Figura III.6 es un croquis de una torre de absorción que muestra los símbolos adecuados relativos a las corrientes gaseosas y líquidas.

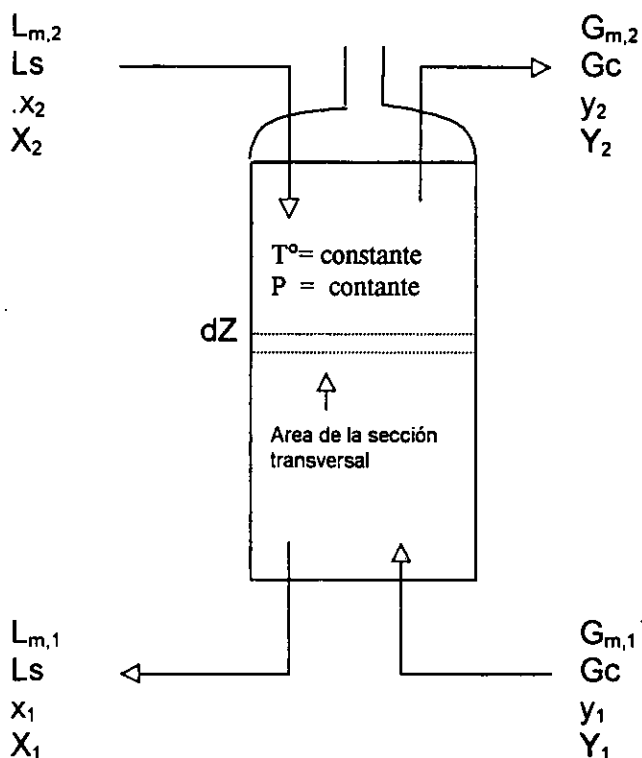


Figura III.6 Nomenclatura apropiada para una torre de adsorción (corte transversal)

Donde :

$G_{m,1}$, $G_{m,2}$ = Gasto total de gas (gas portador mas contaminante), de entrada y salida a la torre respectivamente. { kg-mole/hr}.

y_1 , y_2 = Fracción molar de la fase gaseosa de la especie contaminante, en la entrada y salida a la torre respectivamente.

Donde :

$$y = \frac{P}{P_1} \quad \text{Ec.5}$$

donde :

P = Presión parcial del gas contaminante

P₁ = Presión total del gas

L_{m,1}, L_{m,2} = Es el gasto total de líquido (solvente mas contaminante absorbido) de entrada y salida a la torre respectivamente. { kg*mole/hr}.

x₁, x₂ = Fracción molar líquida de la especie contaminante;

X₁, X₂ = Tasa molar de la fase líquida, en términos de la especie contaminante,

X₁, X₂ = Tasa molar de la fase gaseosa, en términos de la especie contaminante

L_s = Gasto del solvente {mole/hr}.

Se utiliza el subíndice "m" con los símbolos G y L para indicar que dichos gastos se establecen sobre una base molar.

El principio de la conservación de masa, aplicado a la especie contaminante en términos de los gastos totales de masa en la parte superior e inferior de la columna se puede expresar por medio de la ecuación:

$$(G_{m,1})(y_1) - (G_{m,2})(y_2) = (L_{m,1})(x_1) - (L_{m,2})(x_2) \quad \text{Ec.6}$$

Si se supone que las masas del gas y del líquido que pasan a través de la torre no cambian apreciablemente, se puede escribir la Ecuación (Ec.2) como:

$$Y_1 - Y_2 = \frac{L_M}{G_M} (X_2 - X_1) \quad \text{Ec.7}$$

La Ecuación (Ec.3) representa una línea recta, la cual al graficarse, representa la condición de operación de la torre empacada (Figura III.7):

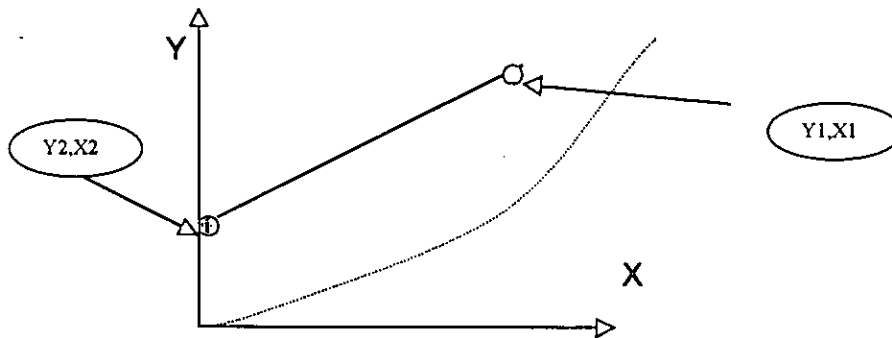


Figura III.7 Representación del balance de masa

Los puntos sobre la línea de operación representan las concentraciones de volúmenes de gas y líquido en alguna posición arbitraria de la columna. Una vez establecida la línea de operación, se establecen condiciones ideales de Absorción, es decir, se supone que la absorción del gas en el líquido se lleva a cabo de manera uniforme, dicho comportamiento se establece mediante la ley de Henry (y^*, x^*).

En general, son tres las variables de interés para el diseño de una torre empacada :

1. Gasto del gas contaminado a tratar.
2. Gasto del líquido absorbente.
3. Altura de la torre (que determina el área total para la transferencia de masa).

Los dos primeros se conocen mediante un estudio general de la industria que pretende instalar el dispositivo. La Altura de la Torre se puede determinar por medio de estudios de una planta piloto. (planta a escala que trabaje tomando en cuenta las condiciones de operación reales), así de datos experimentales se ha llegado a la siguiente expresión:

$$Z = (H_g)(N_g) \tag{Ec.8}$$

Altura de la torre = Z

$$Z = (\text{número de unidades de transferencia})(\text{altura unitaria de una unidad})$$

donde:

$$N_g = \frac{\ln \left[\left(\frac{y_1 - mx_2}{y_2 - mx_2} \right) (1 - A) + A \right]}{1 - A} \quad \text{Ec.9}$$

donde :

y_1, y_2 = Fracción molar de la fase gaseosa de la especie contaminante, en la entrada y salida a la torre respectivamente.

m = Pendiente de la curva de equilibrio,

x_2 = Fracción molar líquida de la especie contaminante

$A = mQ_g/Q_l$

Q_l = volumen de líquido utilizado en le proceso {kg*mole/h*m²}

Q_g = volumen de gas contaminado que entra al proceso {kg*mole/h*m²}

Donde :

$$H_g = H_e + A(H_n) \quad \text{Ec.10}$$

H_e y H_n dependen completamente de las características de los empaques que se utilicen para distribuir el absorbente en el interior del líquido.

III.3.3 Especificaciones y construcción

Los requisitos generales que será preciso cumplir en el diseño o selección de un equipo de adsorción adecuado, incluyen:

- 1) una instalación que permita un suficiente tiempo de detención de los contaminantes
- 2) tratamiento previo de la corriente de gas para eliminar la materia no absorbible que pudiera perjudicar la operación del lecho de adsorción,
- 3) tratamiento previo para eliminar altas concentraciones de otros gases mediante otros procesos mas efectivos a fin de evitar la sobrecarga del sistema de adsorción,
- 4) buena distribución del flujo a través del lecho
- 5) provisión para renovar o regenerar el lecho absorbente después de que haya llegado a la saturación. En general, se puede elegir entre un tipo regenerativo y uno no regenerativo (desechable), y entre uno de carga intermitente y otro de operación continua.

Por lo general, cuando la concentración de contaminante en la corriente de gas que entra al adsorbedor es menor de 1 o 2 ppm, se desecha el material adsorbente y el absorbido. En este caso, se utilizan elementos adsorbentes no regenerativos de reemplazo. Sin embargo, desechar los elementos sin eliminar el adsorbato será completamente seguro, solo si el adsorbato no fuera volátil.

Cuando la concentración del contaminantes muy alta (>2 ppm), se emplean sistemas de cámaras múltiples del tipo regenerativo (Ver Figura III.8). En general, las velocidades del gas en cada absorbedor son de 0.1 a 0.5 m/seg. con tiempos de retención de 0.6 a 6 seg.

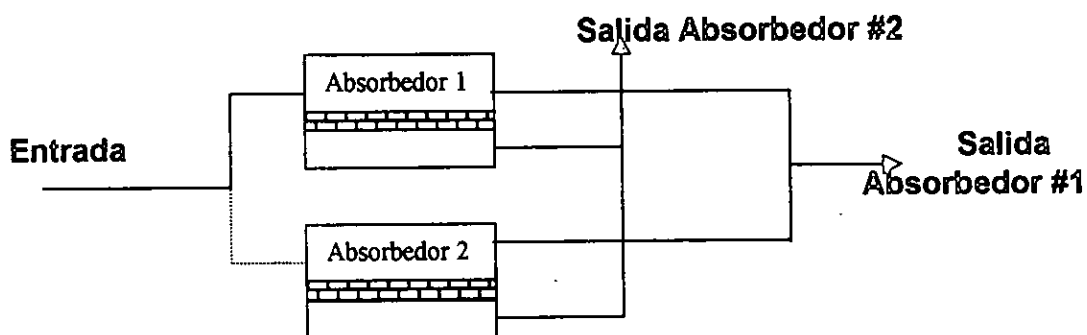


Figura III.8

III.3.5 Fabricantes

Nombre de la Empresa	Dirección WEB
<ul style="list-style-type: none"> ◦ - MikroPul Dynamic Scrubber especialista en torres empacadas 	<p>http://www.nauticom.net/www/jhorst</p>
<ul style="list-style-type: none"> ◦ - Rauschert Verfahrenstechnik. Rapsody , combina la utilizacion de modelos computacionales para el diseño y construccion de torres empacadas 	<p>http://www.vta.mw.tumuenchen.de/rauschert/rapsody.html</p>
<ul style="list-style-type: none"> ◦ Enviro-Chem Systems. ODORGARD. TM. SYSTEMS. Empresa con 25 años de experiencia en el diseño de torres empacadas / 	<p>http://www.envirochem.com/pollution/odorgar</p>
<ul style="list-style-type: none"> ◦ Vapour Elimination. GCD, especialista en la eliminacion devapores, hidrocarburos volátiles, mediante el uso de torres empacadas 	<p>http://www.gcd.com.au/pages/products/prod053.htm</p>
<ul style="list-style-type: none"> ◦ Plas-Tanks Industries, Inc., epmresa dedicada a la distribucion de refaciones para torres empacadas. 	<p>http://www.plastanks.com/</p>

III.3.5 Ejemplo del diseño de una torre empacada

Una empresa ubicada en la Ciudad de México, quiere instalar una torre empacada para bajar sus emisiones de NH_3 de 0.1 kg/m^3 a 0.005 kg/m^3 , para esto en el patio central cuenta solo con espacio para instalar una torre con diámetro menor a 3.0 m.

Para esto, la empresa cuenta con la siguiente información:

Temperatura de salida de los gases : 20.0°C .

Presión de operación : 101.325 kPa.

$Q_g = Q_l = 10.0 \text{ kg/seg}$.

Pendiente de la curva de equilibrio(Perry Chemical Handbook ,1973).
para NH_3 (m) = 1.068

$H_e = 0.438 \text{ m}$.

$H_n = 0.25 \text{ m}$.

El problema se empieza por convertir a Fracciones molares los diferentes elementos en cuestión. (se utiliza el Numero atómico de cada uno de los componentes).

Para el NH_3 :

N \longrightarrow $(14) * 1 = 14$
H \longrightarrow $(1) * 3 = 3$

Suma \longrightarrow $17 = \text{GMW de } \text{NH}_3$

Para el aire que entra a la cámara : \longrightarrow GMW = 28.97 de aire

Para el agua \longrightarrow GMW = 18.015 de H_2O

Se sabe que la fracción molar de contaminante a la entrada de la torre será :

$$y_1 = \frac{\text{concentración a la entrada}}{\text{concentración de aire}} = \frac{\frac{0.10 \text{ kg/m}^3}{17 \text{ GMW de } \text{NH}_3}}{\frac{1.205 \text{ kg/m}^3}{28.97 \text{ GMW de aire}}} = 0.1411$$

$$y_2 = \frac{\text{concentración a la salida}}{\text{concentración de aire}} = \frac{\frac{0.0005 \text{ kg/m}^3}{17 \text{ GMW de NH}_3}}{\frac{1.205 \text{ kg/m}^3}{28.97 \text{ GMW de aire}}} = 0.000706$$

a su vez :

$$A = \frac{mQg}{Ql} = \frac{(1.068) \frac{10.0 \text{ kg/m}^3}{28.97 \text{ GMW de aire}_3}}{\frac{10.0 \text{ kg/m}^3}{18.015 \text{ GMW de agua}}} = 0.6441$$

sustituyendo en la ecuación (Ec.9):

$$Ng = \frac{\ln \left[\left(\frac{y_1 - mx_2}{y_2 - mx_2} \right) (1 - A) + A \right]}{1 - A}$$

$$Ng = \frac{\ln \left[\left(\frac{0.1411 - 1.068(0)}{0.000706 - 1.068(0)} \right) (1 - 0.6641) + 0.6641 \right]}{1 - 0.664} = 12.5539$$

de la ecuación (Ec.10) :

$$Hg = He + A(Hn) = 0.438 + 0.664(0.250) = 0.6040 \text{ m}$$

La altura de la torre empacada será :

$$Z = Hg * Ng = (0.6040 \text{ m})(12.5539) = 8.00 \text{ m}$$

CAPITULO IV

IV CONCLUSIONES

El aire constituye uno de los principales factores ambientales debido a su importancia determinante en la salud de los seres vivos y particularmente del hombre.

Actualmente ante los problemas de contaminación atmosférica es necesario realizar estudios más profundos sobre su control para conocer con detalle las formas en que podemos mitigar los efectos sobre el medio ambiente.

Durante el desarrollo de los capítulos se mostró de manera clara los problemas que están presentes en el diseño y construcción de los diferentes dispositivos de control de contaminantes generados por fuentes fijas como son:

- No existen estudios previos para establecer los límites máximos permisibles de contaminantes atmosféricos.
- En el diseño de los diferentes dispositivos se utilizan datos empíricos, lo que genera que el dispositivo de control no se diseñe tomando en cuenta las características reales de operación para México.
- En la actualidad existen muchos fabricantes de dispositivos de control de contaminantes generados por fuentes fijas, que indican las especificaciones de diseño de sus equipos, pero no las consideraciones constructivas para su colocación y obras complementarias.
- Para la instalación y mantenimiento de los diferentes equipos se debe recurrir a los fabricantes, por lo que se debe contratar de manera permanente los servicios de personal extranjero, el cual no conoce las condiciones en que trabajará el equipo.
- Actualmente no existe ninguna empresa mexicana dedicada al diseño y construcción de dispositivos de control de contaminantes atmosféricos, teniendo como consecuencia que solamente las industrias con recursos financieros los tengan y por lo tanto se encuentren dentro de las Normas establecidas.

Resumiendo se puede señalar que el diseño y construcción de los diferentes dispositivos de control de contaminantes generados por fuentes fijas implica tener presente los siguientes aspectos:

- Conocer las características generales de la atmósfera circundante al proyecto.
- Conocer las características generales del contaminante y su volumen emitido a la atmósfera.
- Evaluar los diferentes dispositivos tomando en cuenta las especificaciones dictadas por el fabricante y las características particulares de operación.
- Construir o instalar el equipo seleccionado tomando en cuenta las consideraciones constructivas tanto del fabricante como las propuestas según el diseño realizado.
- Es posible diseñar y construir la mayoría de los dispositivos de control de contaminantes atmosféricos generados por fuentes fijas con materiales existentes en el mercado mexicano, para lo cual se deben apoyar las investigaciones realizadas sobre el tema en las diferentes instituciones educativas.

Por último cabe mencionar que la presente tesis también tiene como objetivo el abrir una ruta de investigación que permita desarrollar de manera particular cada uno de los capítulos que la conforman, a su vez esta tesis servirá como apoyo didáctico para la materia de Impacto Ambiental impartida a los alumnos de la carrera de Ingeniero Civil en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

BIBLIOGRAFIA

C.N.D.H.

La contaminación atmosférica en México, sus causas y efectos en la salud.

Comisión Nacional de Derechos Humanos, coordinador Ivan Restrepo, México, 1992.

Ing. Alba B. Vázquez González

Apuntes de clase de Impacto Ambiental

División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1993

Mackenzie L.Davis, David A. Comwel

Introduction to Environmental Engineering

McGraw-Hill, second edition, New York, 1991.

Secretaria de Desarrollo Social

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

México 28 enero de 1997.

W.Strauss. S.J. Mainwaring

Contaminación del aire, causas, efectos y soluciones

Trillas, México, 1990.

Kenneth wark, Cecil F. Warner

Contaminación del aire, origen y control

Limusa, México, 1990

Páginas en internet consultadas:

- ❖ <http://www.unam.mx>
- ❖ <http://www.CVM.com>
- ❖ <http://www.clean-air.com>
- ❖ <http://www.air-control-SX.com>