

U. 2. 0
MAN
VI. II

MANUAL DE INGENIERIA AMBIENTAL II

Dirección y diseño:

Elena Castro Martínez

Domingo Jiménez Beltrán



R. 1.728

Escuela de Organización Industrial

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA

Depósito Legal: M-41277-1980

ISBN 84-600-2093-2 (T.2)

ISBN 84-600-2091-6 (O.C.)

Edita: Escuela de Organización Industrial. M^o de Industria y Energía.
Gregorio del Amo, 6 - Madrid-3

INDICE GENERAL

TOMO I

PROLOGO

PRESENTACION

AREA 1 : BASES AMBIENTALES

1. - MEDIO AMBIENTE, RECURSOS Y TECNOLOGIAS
2. - BIOLOGIA GENERAL
3. - CONCEPTOS BASICOS DE ECOLOGIA
4. - MEDIO FISICO-RECEPTORES
5. - ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE
6. - ALIMENTACION-RECURSOS
7. - SANIDAD AMBIENTAL
8. - SOCIOLOGIA AMBIENTAL

TOMO II

AREA 2 : INGENIERIA AMBIENTAL

1. - PROCESOS CONTAMINANTES
2. - CONTAMINACION ATMOSFERICA

TOMO III

AREA 2 : INGENIERIA AMBIENTAL (CONTINUACION)

3. - CONTAMINACION DE AGUAS
4. - CONTAMINACION DE SUELOS

TOMO IV

AREA 2 : INGENIERIA AMBIENTAL (CONTINUACION)

5. - PROBLEMATICA DE RESIDUOS
6. - CONTAMINACION POR RUIDO Y VIBRACIONES
7. - RADIACTIVIDAD
8. - ESTETICA Y PAISAJE

TOMO V

AREA 3 : GESTION AMBIENTAL. ASPECTOS INTEGRADORES

1. - PLANIFICACION INTEGRAL DE RECURSOS
2. - ECONOMIA DEL MEDIO AMBIENTE
3. - GESTION AMBIENTAL DE LA EMPRESA
4. - MARCO INSTITUCIONAL
5. - LEGISLACION AMBIENTAL
6. - ESTUDIOS Y EVALUACIONES DEL IMPACTO AMBIENTAL

TEMA 1

PROCESOS CONTAMINANTES

ELABORADO POR :

F. DE LORA SORIA

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.1./9...		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
E.O.I. MINER			01	10	80

INDICE

	<u>Pág.</u>
1. - INTRODUCCION	1
2. - CONTAMINACION ATMOSFERICA	3
3. - CONTAMINACION DE LAS AGUAS	9
4. - RESIDUOS SOLIDOS	20
3. - CONTROL DEL RUIDO	23
6. - CONCLUSION	25

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	HOJA 2.1 / . . 1.		
	1		FECHA		
E. O. I. MINER	1	CAPITULO: INTRODUCCION	01	10	80

Los procesos contaminantes pueden ser de origen "natural" o "artificial". En efecto, el aire se contamina con tormentas de polvo y arena, con incendios forestales, con erupciones volcánicas, que arrojan a la atmósfera toneladas de partículas y gases. Los animales muertos y las plantas en descomposición desprenden gases y las flores saturan el aire con el polen que causa reacciones alérgicas al hombre.

En 1968 el Stanford Research Institute realizó una estimación de las emisiones anuales mundiales de varios contaminantes atmosféricos. Parte de sus resultados se presentan en la tabla siguiente.

EMISIONES ANUALES MUNDIALES EN TONS.

	Contaminación	
	Artificial	Natural
SO ₂	146 x 10 ⁶	---
SH ₂	3 x 10 ⁶	100 x 10 ⁶
CO	220 x 10 ⁶	11 x 10 ⁶
NO/NO ₂	53 x 10 ⁶	500 x 10 ⁶
NH ₃	4 x 10 ⁶	5.900 x 10 ⁶
N ₂ O	---	1.000 x 10 ⁶
Hidrocarburos	88 x 10 ⁶	480 x 10 ⁶
CO ₂	1,3 x 10 ⁶	1 x 10 ¹²

Puede observarse que las emisiones naturales constituyen un alto porcentaje sobre el total y que, incluso son, en algunos casos muy superiores a las artificiales (en el caso del amoníaco, procedente de degradación biológica 1.500 veces).

Sin embargo, el problema está en que la contaminación "natural" se minimiza al compararla con la "artificial", ya que ésta, aunque menor en general en valores absolutos, aparece normalmente concentrada en ciertas áreas. Por otra parte no hay que olvidar que esta forma de contaminación artificial, o provocada por el hombre, es tan antigua como su propia existencia sobre el planeta y que en los primeros tiempos de la llamada era industrial las chimeneas humeantes se consideraban con orgullo como signo de progreso.

No obstante éste no es ya el caso. En los últimos tiempos, el rápido crecimiento industrial producido por una población cada día más ansiosa de mejores estándares de vida, ha conducido a la situación de deterioro del entorno por todos conocida y que, desde luego, resulta preocupante.

Los procesos contaminantes pueden ser también "urbanos" o "industriales".

En este caso, también puede afirmarse que aquéllos son más importantes que éstos en términos absolutos. Se proporcionan, a continuación, algunas cifras. Pero antes, conviene advertir que la falacia podría estar en una separación mecanicista entre ciudad e industria.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	HOJA 2.1 / 2..		
	1		FECHA		
E.O.I. MINER	1	CAPITULO: INTRODUCCION	01	10	80

En la tabla que sigue se indican las emisiones en porcentajes típicos que la industria y las actividades urbanas producen de los principales contaminantes en los países desarrollados.

Actividad	Porcentajes de emisión de				
	CO	SO ₂	HC	Partículas	NO _x
Tráfico	91,6	2,2	64,7	15,0	38,8
Industria	2,8	37,8	24,7	50,0	20,0
Producción de energía	0,8	44,3	0,7	20,0	30,0
Calefacción doméstica	2,8	14,8	3,3	10,0	10,0
Incineración de basuras	2,0	0,9	6,6	5,0	1,2
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Como puede verse en los datos anteriores el tráfico es el principal responsable de la emisión de monóxido de carbono, hidrocarburos inquemados y óxidos de nitrógeno. La producción de energía emite más dióxido de zufre que la industria o las actividades domésticas, y finalmente, la industria es la mayor generadora de partículas lanzadas a la atmósfera.

1.1. TIPOS Y FUENTES DE CONTAMINACION.

Hace algunos años la palabra contaminación se empleaba fundamentalmente para indicar la deterioración de la calidad del aire y, en menor grado, la de las aguas. Hoy en día, el término debe acompañarse del adjetivo adecuado, ya que contaminación solamente significa casi cualquier acción que produce una alteración del entorno natural. Además de las citadas contaminaciones del aire y del agua, contaminación puede ser la basura al lado de caminos y carreteras, la acumulación de residuos urbanos, el exceso de energía lumínica, o el ruido de un tren o un avión a reacción.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 1. / 3...		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
E. O. I. MINER	2	CAPITULO: CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

La contaminación atmosférica representa en general la mayor preocupación. La combustión de carbón, fuel y gas en nuestros hogares, vehículos y fábricas conduce a la descarga en la atmósfera de SO_2 , CO_2 , CO , NO_x e hidrocarburos parcialmente quemados.

El SO_2 se asocia con la humedad para formar una atmósfera corrosiva que, probablemente en combinación con las partículas en suspensión, se considera dañina tanto para los seres vivos como para la materia inanimada.

Los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos inquemados pueden bajo condiciones específicas, sufrir cambios químicos en la atmósfera, por efecto de la luz solar, dando lugar a lo que se conoce como "smog" fotoquímico. (Es bien sabido que "smog" es la resultante de las dos palabras inglesas "smoke" humo y "fog", niebla; de dudosa traducción, por tanto, al castellano).

El monóxido de carbono es, desde luego, altamente tóxico y se teme que en las zonas de gran densidad de tráfico pueden alcanzarse niveles excesivos.

Por último, el dióxido de carbono, siendo como es un compuesto esencial en el ciclo vital de los seres animados, no puede, a priori, considerarse como contaminante. A pesar de todo, el estar añadiendo a la atmósfera en tales cantidades que, según algunos especialistas, hacia el 2.000, su concentración puede modificar el balance de calor como para producir cambios climatológicos sustanciales, en el sentido de un aumento muy considerable de las temperaturas medias de nuestro planeta. (Se ha llegado a hablar, incluso, de aumento del nivel de las aguas marítimas como consecuencia de la fusión de los casquetes polares).

Otros contaminantes atmosféricos esenciales son los gases de escape y la materia en suspensión. Esta última se produce en forma de cenizas volantes y hollín que se emiten por las chimeneas, o en la de catalizadores procedentes de los procesos de regeneración, o en la de polvos metálicos de las industrias metalúrgicas y siderúrgicas, etc. Puede provocar cielos nublados, la deposición de películas de suciedad en el suelo y actuar como vehículo de transporte de otros contaminantes.

Se han desarrollado teorías con respecto a la actuación de la materia en suspensión, que suponen que su acumulación en la atmósfera produce la reflexión de la luz solar desde la tierra provocando un efecto de enfriamiento contrario al de "invernadero" mencionado antes en relación al dióxido de carbono. Esta teoría no resulta tan seductora como a primera vista pudiera parecer, pues los científicos de esa escuela predicen que, por ese mecanismo, la tierra volvería a otra era glacial.

En la contaminación atmosférica, se han definido dos criterios: el de emisión y el de inmisión. La inmisión (o como se denominaba anteriormente, concentración a nivel del suelo) se refiere a la cantidad de materia contaminante por unidad de volumen de aire que puede estar presente en la atmósfera circulante a los focos emisores durante períodos establecidos de tiempo. Su control cae de lleno dentro del campo de la higiene, pero debido a que las legislaciones de los diversos países imponen junto a los de emisión, criterios de inmisión a las industrias, éstas deben enfrentarse actualmente al problema de su medida.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	HOJA. 2:1/...4.		
	1		FECHA		
E.O.I. MINER	2	CAPITULO: CONTAMINACION ATMOSFERICA	01	10	80

Por ello la lista de sustancias consideradas puede resultar tan exhaustiva como se desee. Por ejemplo, la Occupational Safety and Health Administration norteamericana (OSHA) ha fijado límites máximos tolerables (8 horas de exposición) para 400 gases.

Sin embargo, la Environmental Protection Agency (EPA) ha considerado un número mucho menor de parámetros a la hora de fijar regulaciones de emisión y de inmisión. En las tablas siguientes se indican dichos parámetros y los valores limitativos correspondientes, para emisión e inmisión respectivamente.

Regulaciones EPA para emisiones

Contaminante	Generadores de vapor			Plantas de cemento		Manufactura de	
	Carbón	Fuel-oil	Gas	Horno	Enfriador	SO ₄ H ₂	NO ₃ H
	libras/10 ⁶ Btu			lb/ton			
NO _x	0,70	0,30	0,20	-	-	-	3
SO _x	1,2	0,8	-	-	-	4	-
Poivo	0,10	0,10	0,10	0,30	0,10	-	-
Opacidad %	20	20	20	10	10	10	-
Niebla ácida	-	-	-	-	-	0,15	-

Regulaciones EPA para inmisión.

(Estandares primarios = para proteger la salud humana).

<u>Contaminante</u>	<u>Regulación, mg/m³</u>
SO ₂	0,080 (media anual)
	0,365 (media 24 h)
Polvo	0,075 (media anual)
	0,260 (media 24 h)
NO _x	0,100 (media anual)
CO	40 (máx. 1 h)
	10 (máx. 8 h)
Hidrocarburos	0,160 (máx. 3 h)
Oxidantes fotoquímicos	0,160 (máx. 1 h)

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	HOJA. 2.1/ . 5. . .		
	1		FECHA		
E.O.I. MINER	2	CAPITULO: CONTAMINACION ATMOSFERICA	01	10	80

La primera etapa del trabajo a realizar para establecer un programa de disminución de la contaminación atmosférica es clasificar los contaminantes de acuerdo con sus propiedades físicas: esto es, si se trata de gases o de partículas sólidas o líquidas, finas o gruesas, ligeras o pesadas.

Las emisiones de partículas pueden disminuirse mediante:

- separadores mecánicos
- separadores húmedos
- filtros de mangas
- precipitadores electrostáticos

y el control de gases puede llevarse a cabo por, fundamentalmente;

- lavado (absorción)
- adsorción
- incineración

2.1. SEPARADORES MECANICOS

La forma más simple y económica de separación de partículas es la de tipo mecánico, en seco, haciendo uso de las fuerzas inerciales, y su versión más conocida y desarrollada corresponde al ciclón.

El gas, que arrastra las partículas, es forzado a circular en un vértice en el tubo cilíndrico del ciclón. La rotación de la masa de partículas con el gas transportador, obliga a éstas a dirigirse a las paredes del tubo por efecto de la fuerza centrífuga. Las partículas chocan con la pared, pierden su velocidad, y por gravedad, o corrientes "eddy" secundarias caen hacia la salida de polvo situada en la parte inferior del tubo. Al mismo tiempo, la corriente de gas sigue un camino inverso, saliendo a través de un tubo interior, que puede contener sistemas para reducir la energía requerida. Se necesita una velocidad tangencial elevada. El rendimiento de separación de los ciclones -que varía de 50 a 90%- es directamente proporcional a la velocidad radial.

La limitación principal de los separadores mecánicos es el tamaño de partícula. El rendimiento decae rápidamente para partículas menores de 10 μm de diámetro. El funcionamiento mejora cuando la concentración es superior a 20 g/m^3 .

Por todo lo anterior los ciclones se aplican cuando no se requieren rendimientos elevados, para partículas gruesas y concentraciones elevadas.

Los costes de operación de los separadores mecánicos son bajos debido a que la caída de presión de diseño raramente supera los 10 cm. c.d.a. En teoría, las caídas de presión elevadas o los diámetros pequeños de tubo, que conducen a velocidades altas, podrían dar lugar a la separación eficaz de partículas pequeñas, pero, en la práctica, la coagulación de partículas y el taponamiento, limitan la energía utilizable.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	HOJA 2.1./6...		
	1		FECHA		
E.O.L. MINER	2	CAPITULO: CONTAMINACION ATMOSFERICA	01	10	80

La temperatura no suele ser un problema para estos separadores. En algunos casos se han utilizado para temperaturas superiores a los 1.000 °C; pero ya que sufren el problema del taponamiento no son recomendables en los casos en que la temperatura de trabajo sea inferior al punto de rocío.

2.2. SEPARADORES HUMEDOS

Más complejos y caros son los separadores inerciales húmedos, conocidos por "lavadores", que pueden separar gotas y partículas. Las partículas a velocidad chocan sobre las partículas de agua con fuerza suficiente como para ser atrapadas.

El rendimiento de los lavadores depende del radio de la partícula, de su densidad y de la velocidad relativa entre la partícula y la gota; los tres parámetros deben ser altos, pero, incluso si la densidad y el radio de la partícula son pequeños, el lavador puede aceptar suficiente energía para alcanzar rendimientos elevados mediante una velocidad relativa alta. Sin embargo, para conseguir la energía elevada necesaria se requieren grandes caídas de presión. La utilización de esta energía elevada supone normalmente la atomización del líquido de lavado y la mezcla turbulenta con el gas contaminado que se acelera mediante un venturi. La corriente de gas puede realizar la atomización, o el líquido puede pulverizarse a través de boquillas. Es normal actualmente, variar el área de la garganta del venturi, ya que ello permite pérdidas de carga óptimas con caudales distintos de gas. También se practica la recirculación del líquido de lavado; de esa forma el único agua que se purga del sistema es la correspondiente a evaporación, y a la que acompaña a la papilla concentrada de las partículas separadas. Una limitación al empleo de la recirculación es el taponamiento de las boquillas pulverizadoras.

Operando a velocidades de entrada de gas elevadas se requiere muy poco espacio para los lavadores. El contenido de humedad del gas tiene poco efecto sobre el funcionamiento de los lavadores, que resultan adecuados para tratar gases de combustión.

Los rendimientos de los lavadores varían desde menos de 80% para las torres de pulverización hasta casi 99% para los del tipo venturi.

2.3. FILTROS DE MANGAS

La filtración para la separación de partículas se realiza normalmente utilizando filtros de tela, en forma de bolsas o mangas que se inflan con el gas que va a limpiarse. El gas fluye de dentro a fuera de la bolsa, y las partículas son atrapadas primero por el tejido y, posteriormente, por la torta de partículas acumuladas. La operación es similar a la de las aspiradoras domésticas excepto en que se proveen medios para recoger las partículas sin retirar la bolsa. Los límites prácticos sobre la cantidad de gas que una sola bolsa puede filtrar obliga al empleo de una serie de ellas. Normalmente unas bolsas se limpian mientras otras siguen en operación. La mayor ventaja de los filtros de mangas es su elevado rendimiento, independientemente del tamaño de partícula. Los problemas que presentan los filtros de mangas están asociados generalmente al tamaño de la bolsa, al tipo de tejido, al método de limpieza y la pérdida de carga.

Conforme el material separado se acumula sobre el tejido aumenta la pérdida de carga. Antes de que la presión crezca excesivamente comp para dañar la bolsa, ésta debe limpiarse. Los métodos de limpieza

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.1./7...		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	F E C H A		
E.O.I. MINER	2	CAPITULO: CONTAMINACION ATMOSFERICA	01	10	80

empleados son: agitación mecánica, ondas de choque, agitación neumática, impulso de presión. La operación de limpieza y el impacto de las partículas tienen efectos destructivos sobre el tejido por lo que las mangas se deterioran con el tiempo y, consecuentemente, deben reemplazarse.

2.4. PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS.

La tendencia al empleo de los precipitadores electrostáticos parece que es decreciente frente al aumento de los filtros de mangas y de los lavadores.

El precipitador electrostático requiere muy poca energía debido a que su acción de limpieza se aplica solamente a las partículas. Resultado: un sistema adecuado a grandes volúmenes de gas y partículas sub-micrónicas.

Los elementos básicos de los precipitadores electrostáticos son una fuente de corriente de alta tensión, un electrodo corona o de descarga, un electrodo pasivo o colector y una tolva para recogida del material separado. En operación, se crea un plasma eléctrico de pares ión-electrón positivos en la región próxima al electrodo de descarga, lo que provoca que los iones unipolares de gas emigren hacia el electrodo colector. Conforme estos iones migratorios encuentran las partículas en la corriente gaseosa les imparten carga. El campo entre los dos electrodos hace que las partículas cargadas se dirijan al electrodo colector. La partícula recogida se separa entonces del electrodo colector, normalmente mediante alguna forma de agitación mecánica.

Dos factores inciden sobre la operación del precipitador: la densidad del gas y la conductividad eléctrica de las partículas, lo que afecta al voltaje máximo (de 60.000 a 100.000 V) y a la resistividad de las partículas, que podría dar lugar a un gradiente ineficaz de tensión si fuera demasiado elevada, o a que las partículas volvieran fácilmente a la corriente de gas si fuera demasiado baja.

Se han ensayado algunas modificaciones en los precipitadores convencionales como son el revestimiento de plomo para recoger nieblas ácidas, el funcionamiento a presión negativa, la adaptación para trabajar a temperaturas de hasta 500 °C y, la operación en conexión con separadores mecánicos y lavadores.

2.5. CONTROL DE EMISIONES GASEOSAS.

Los contaminantes gaseosos pueden separarse de las corrientes de aire mediante lavado, adsorción o incineración, principalmente. Generalmente se emplea el lavado para contaminantes solubles en agua a concentraciones superiores al 1%. La incineración directa o catalítica puede emplearse para vapores combustibles. La adsorción se utiliza para gases a bajas concentraciones.

El carbón activo es el adsorbente más utilizado. Se emplean, además, alúmina, bauxita, tamices moleculares, gel de sílice, arcillas y resinas de intercambio iónico.

En las unidades adsorbentes de lecho fijo, para grandes volúmenes de gas, se utilizan grupos de lechos horizontales. Un grupo se encuentra en operación mientras el otro está regenerándose. También puede

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA.2.1 / ...8.		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
E. O. I. MINER	2	CAPITULO: CONTAMINACION ATMOSFERICA	01	10	80

llevarse a cabo la adsorción en continuo, utilizando un anillo que contiene el adsorbente. La alimentación de gas penetra a través de toberas en la carcasa, pasa por el lecho y lo abandona a través de toberas en el interior de un cilindro. El vapor de regeneración se introduce mediante válvulas al carbón conforme éste alcanza el punto más bajo en el cilindro.

La recuperación de disolventes parece que resulta práctica solamente a concentraciones por encima de 1.000 ppm.

La incineración puede separar gases y aerosoles combustibles, eliminando compuestos tóxicos o malolientes y, además, el peligro de explosión, con rendimientos de hasta el 90%. Las temperaturas de trabajo dependen del material a separar, pero son normales las comprendidas entre 600 y 8.000 °C. Sus ventajas son: sencillez, rendimiento elevado, insensibilidad relativa a la composición de contaminantes, equipo compacto y de larga duración, pérdida de carga pequeña y mantenimiento moderado.

Los catalizadores juegan un papel importante en la incineración cuando la concentración de contaminantes es demasiado pequeña para mantener temperaturas adecuadas de destrucción. El proceso transcurre bajo condiciones dinámicas de oxidación y reducción de la superficie. Si en la corriente gaseosa no existen compuestos que puedan envenenar el catalizador, éste puede ser efectivo durante periodos largos de tiempo sin regeneración.

Las industrias que pueden utilizar la incineración catalítica son, por ejemplo, las de fabricación de pinturas, lacas y barnices, las imprentas, las refinerías, las de alimentación y cualesquiera otras que emitan hidrocarburos, disolventes o vapores combustibles.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.1 / .9..		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
	3	CAPITULO: CONTAMINACION DE LAS AGUAS	01	10	80

Los efectos que el vertido de las aguas residuales industriales pueden causar en los cauces receptores de esos vertidos pueden dividirse en tres grupos:

- Efectos directamente tóxicos
- Reducción del contenido de oxígeno
- Efectos indirectamente tóxicos

3.1. EFFECTOS DIRECTAMENTE TOXICOS.

Los vertidos que pueden considerarse directamente tóxicos son aquellos que contienen sustancias, cuya acción dañina es suficientemente conocida, como el cromo hexavalente, los cianuros, el arsénico, el mercurio o los radionúclidos. En la tabla siguiente, se indican algunas sustancias tóxicas a la vida piscícola, con expresión de las concentraciones letales aproximadas.

SUSTANCIAS TOXICAS A LA VIDA PISCICOLA

<u>SUSTANCIA</u>	<u>CONCENTRACION LETAL APROXIMADA mg/l</u>
Amoníaco	2 - 3
Anilina	100
Cianuros	0,04 - 0,1 (CN)
Cinc	0,01
Cloramina	0,06
Cloro libre	0,03
Cloruro mercúrico	0,01 (Hg)
DDT	0,01
Fluoruros	2,5 - 6,0
Nitrato de plata	0,004 (Ag)
Ozono	0,01
Plomo	0,1
Sulfato de alcohol-benceno (ABS)	1 - 3
Sulfato de cobre	0,03

Los ácidos y los álcalis no sólo originan problemas de corrosión cuando se descargan a una corriente, sino que pueden ser también letales a la vida animal y vegetal si cambian el valor del pH a valores alejados de la neutralidad, teniendo en cuenta que el margen adecuado de pH para sustentar esa vida está comprendido entre 5 y 8,5 aproximadamente.

Los metales pesados como el Cu, Zn, Ni, Cr, Cd y Pb pueden ser venenosos a concentraciones inferiores a 1 mg/l.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.1 / .10.		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
E.O.I. MINER	3	CAPITULO: CONTAMINACION DE LAS AGUAS	01	10	80

La toxicidad de estas sustancias no debe considerarse aisladamente, ya que está influenciada por muchos factores, que en consecuencia, deben tenerse en cuenta, con lo que se amplía el número de parámetros a considerar.

Entre dicho factores pueden citarse la temperatura, la dureza, el pH y el oxígeno disuelto.

Un aumento de temperatura de 10 °C dobla la toxicidad de los cianuros con respecto a la vida piscícola.

La dureza puede producir la precipitación de los metales como hidróxidos.

El pH afecta, por ejemplo, la toxicidad del amoníaco (el valor que se da en la tabla anterior es para amoníaco no ionizado). Esta situación se da asimismo para otras sustancias.

Se ha demostrado que el nivel de oxígeno disuelto (por debajo de la saturación) reduce la concentración umbral de toxicidad de algunas sustancias en una cantidad más o menos proporcional a dicho nivel. (Vease la tabla siguiente).

FACTORES DE REDUCCION DE LA CONCENTRACION UMBRAL DE TOXICIDAD DE Pb, Zn, Cu y FENOLES PARA EL "SALMO IRRIDEUS" EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE OXIGENO DISUELTO.

<u>% SATURACION O₂ DISUELTO</u>	<u>FACTOR</u>
100	1
80	0,95
60	0,85
40	0,71

3.2. REDUCCION DEL CONTENIDO DE OXIGENO

Es suficientemente conocido el papel del oxígeno disuelto en los cauces naturales de agua y la conveniencia de mantener condiciones aerobias en los mismos, por lo que no parece necesario en este momento insistir en esos conceptos.

La reducción del contenido de oxígeno en los cauces receptores puede ser debida a tres tipos de sustancias presentes en los vertidos industriales:

- compuestos químicos reductores (como los sulfuros) que producen lo que ha dado en llamarse una "demanda inmediata de oxígeno";

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.1 / 11		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
E.O.I. MINER	3	CAPITULO: CONTAMINACION DE LAS AGUAS	01	10	80

- sustancias lábiles biológicamente, para cuya estabilización bioquímica el oxígeno es esencial, y que lo tomarán, por tanto del disuelto en el agua receptora del vertido;
- agentes tensio-activos, como los detergentes sintéticos y los aceites, que interfieren con la disolución del oxígeno en la interfase aire-agua, a través de la cual se produce normalmente la reaeración.

Desde el punto de vista de cuantificación de estos problemas, el segundo tipo de sustancias es, con mucho, el que ha recibido mayor atención. En efecto, la medida de la concentración de las sustancias de los otros dos tipos puede considerarse directa, y, generalmente, se cuenta con métodos apropiados.

La demanda de oxígeno producida por los vertidos conteniendo sustancias biodegradables se ha medido tradicionalmente mediante el ensayo de la DBO.

Debido a las dificultades de realización e interpretación del ensayo de la DBO (que nacen de la serie de suposiciones inherentes a la propia definición del método) y, sobre todo a su larga duración (cinco días para el procedimiento estándar), se han introducido otros ensayos o modificaciones a dicho método.

Entre las modificaciones más importantes al método estándar pueden citarse:

- la medida manométrica de la DBO, utilizando cualquiera de los aparatos diseñados por Sierp, Warburg y Barcroft,
- la sustitución de la medida de la concentración de oxígeno disuelto por el método clásico de Winkler por el método que utiliza los electrodos de membrana.

Los ensayos que se han propuesto como sustitutivos del de la DBO suponen la determinación de los siguientes parámetros:

- demanda química de oxígeno (DQO)
- carbono orgánico total (COT)
- demanda total de oxígeno (DTO)

En la tabla siguiente se resumen las características de estos ensayos.

Las correlaciones entre estos distintos parámetros con la DBO son cuestionables, y actualmente, se investiga profundamente en este aspecto.

La medida de los parámetros DQO, COT y DTO ha sido automatizada y hoy pueden encontrarse muchos modelos de aparatos automáticos que, además, pueden incluir registro y tele-envío de resultados, de funcionamiento continuo.

3.3. EFFECTOS INDIRECTAMENTE TOXICOS

Dentro de esta categoría pueden incluirse: las sustancias que comunican sabor y olor (como el hierro ferroso que produce un sabor característico a concentraciones inferiores a 0,1 mg/l, o los clorofenoles cuyo sabor es detectable a concentraciones de 0,001 mg/l), los sólidos inertes en suspensión y las sales disueltas.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.1 / 12.		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
	3	CAPITULO: CONTAMINACION DE LAS AGUAS	01	10	80

CARACTERISTICAS DE LOS ENSAYOS
PARA LA DETERMINACION DE LOS PARAMETROS
DQO, COT Y DTO.

PARAMETRO	CARACTERISTICA DEL ENSAYO
DQO-Permanganato	Oxidación de la muestra con MnO_4K durante 4h a 27°C y valoración del exceso de oxidante no consumido.
DQO-Dicromato	Oxidación de la muestra con $Cr_2O_7K_2$ en medio SO_4H_2 durante 2 h a ebullición.
COT	Combustión de la muestra en presencia de O_2 y medida del CO_2 por espectrometría infrarroja. El análisis puede realizarse en 2 min.
DTO	Reacción de la muestra con oxígeno a 875 ó 900°C y medida del oxígeno utilizado. El análisis puede realizarse en 5 min.

La materia inerte en suspensión tiene un efecto considerable sobre la vida acuática; a concentraciones muy elevadas (del orden de 1.999 mg/l) pueden causar la muerte directa de los peces por obturación de sus branquias. Su efecto sobre la flora y fauna de los fondos puede ser catastrófico.

La presencia a elevada concentración de sales inorgánicas inertes solubles puede hacer un agua inadecuada para muchos usos; ejemplos de esta situación son las concentraciones de cloruro sódico por encima de 500 mg/l que impiden que el agua sea utilizada como abastecimiento de agua potable, o los sulfatos que por encima de 1.000 mg/l (como SO_3) producen daño al hormigón.

3.4. OTROS EFECTOS.

Además de los efectos citados en los apartados anteriores, que se refieren a cursos de agua, hay que considerar los producidos a dos clases especiales de aguas receptoras: los lagos, o cuerpos estáticos de agua de tamaño similar, y los sistemas municipales de alcantarillado.

El efecto más destacable sobre la primera clase se refiere a la eutrofización por acumulación de nutrientes que hace los lagos fértiles y productivos de exceso de algas con los perjuicios siguientes:

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA.2..1 / .13.		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
E.O.I. MINER	3	CAPITULO: CONTAMINACION DE LAS AGUAS	01	10	80

- el crecimiento excesivo de algas conduce en su descomposición a la producción de olores y sabores
- la reducción del contenido de oxígeno puede acabar con la riqueza piscícola
- impedir su utilización como fuente de abastecimiento de agua

El vertido incontrolado de efluentes industriales en los sistemas municipales de alcantarillado puede ocasionar los efectos siguientes:

- Corrosión y erosión de los sistemas por la presencia de ácidos y álcalis fuertes y sólidos en suspensión.
- Peligro de formación de gases tóxicos tales como SH_2 , CNH_3 , etc.
- Peligro de formación de atmósferas explosivas debido a la presencia de derivados del petróleo, disolventes orgánicos, etc.
- Peligro de obstrucción de flujo por la presencia de grandes cantidades de materia sedimentaria o grasas.
- Y, finalmente, peligro de interferencia en el proceso de depuración.

En la tabla siguiente se indican las condiciones típicas impuestas en Gran Bretaña para la descarga de efluentes industriales en los sistemas municipales de alcantarillado.

CONDICIONES TÍPICAS IMPUESTAS EN GRAN BRETAÑA PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES INDUSTRIALES EN LOS SISTEMAS MUNICIPALES DE ALCANTARILLADO

<u>SUSTANCIA O PARAMETRO</u>	<u>MAXIMO PERMITIDO</u>	<u>RAZON DEL CONTROL</u>
pH	6 - 10	A - B
Alcalinidad (como CO_3C_2)	2500 mg/l	A - B
Sulfatos	1000 mg/l	A
Amoníaco libre (como NH_3)	500 mg/l	C
SS	1000 mg/l	D
Grasas	500 mg/l	B - D
Sulfuros (como S)	10 mg/l	C
Cianuros (como CN)	10-20 mg/l	C
Disolventes orgánicos inmiscibles	Nada	E
Carburo cálcico	Nada	E
Temperatura	45°C	
Petróleo	Nada	
Cromo (como Cr)	50 mg/l	B
Cobre (como Cu)	50 mg/l	B
Aceites	400 mg/l	

- A = Daño a las estructuras
- B = Interferencia con la depuración
- C = Toxicidad
- D = Obstrucción del flujo
- E = Atmósfera explosiva.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2,1 / .14.		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	F E C H A		
E. O. I. M. T. N. E. R.	3	CAPITULO: CONTAMINACION DE LAS AGUAS	01	10	80

3.5. TRATAMIENTO Y DEPURACION.

Los programas de control de la contaminación de las aguas deben comenzar en el punto en que las materias primas se introducen en el proceso. El empleo eficaz de la alimentación y el agua con la ayuda que significan los sistemas de recuperación y recirculación reducirán la producción de efluentes. Las modificaciones de proceso constituyen otra opción.

Las aguas residuales pueden depurarse en la propia planta, en el sistema municipal, en otra planta industrial, o en una combinación de dos cualesquiera de las tres alternativas. La primera etapa para evaluar la mejor localización es identificar los efluentes que son compatibles con el proceso convencional biológico empleado en las plantas municipales y los que deben tratarse de otra forma. Normalmente las plantas depuradoras municipales no tienen capacidad para muchos efluentes industriales debido a los volúmenes y, generalmente, a las cargas elevadas de DBO que presentan.

El concepto de transferir los efluentes a otra planta industrial, aunque no sea frecuente, merece la pena ser considerado. Existe la posibilidad de que ambas compañías puedan ahorrar en inmovilizada y costes de operación al combinar sus residuales (por ejemplo, en el caso de efluentes ácidos y alcalinos, que deberían neutralizarse individualmente antes del vertido, mediante la adición de álcali y ácido respectivamente).

Otro punto importante, después de caracterizar las distintas corrientes de aguas residuales es el empleo de un sistema múltiple de drenaje. Una tentación frecuente es bombear todos los efluentes a un tanque o laguna común, y después tratarlos. Frecuentemente, éste es el camino más difícil y costoso para resolver el problema. Supongase una planta con 500 m³/h de agua residual relativamente fácil de tratar y 5 m³/h de residuales tóxicos o difíciles -cromo hexavalente, cianuros o mercurio, por ejemplo-. Si se mezclan ambas corrientes se tendrán 505 m³ de efluentes muy difíciles de depurar).

Tomadas las medidas previas anteriores hay que pasar, definitivamente, a la depuración propiamente dicha.

Las técnicas disponibles para la reducción de la concentración de contaminantes en las aguas residuales pueden dividirse en dos categorías:

- a) técnicas generales para la reducción del volumen y/o concentración de las aguas residuales mediante medidas internas, reciclado y mejoras de los procesos y/o la operación de la planta;
- b) procesos específicos para la separación de contaminantes.

Técnicas generales.

Una de las mejores técnicas para reducir la descarga de efluentes industriales es, obviamente, la disminución de la producción de efluentes, pero esta técnica fué considerada inalcanzable en el pasado. Actualmente, con el aumento constante del precio del agua, la conciencia de su escasez, la tendencia mundial en lograr el objetivo de descarga cero, la preocupación mundial creciente por los problemas ecológicos, todo en suma contribuyé a una reconsideración crítica de los procedimientos de conservación.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.1 / . . 15.		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	F E C H A		
E. O. I. MINER	3	CAPITULO: CONTAMINACION DE LAS AGUAS	01	10	80

Estos procedimientos incluyen técnicas de recirculación y reuso, por una parte, y de concentración por otra (mediante intercambio iónico, ósmosis inversa y evaporación). Con el empleo de las técnicas mencionadas pueden esperarse los porcentajes de ahorro de agua siguientes:

Recirculación de aguas de refrigeración	50
Reutilización de efluentes tratados por filtración	30
Desmineralización de todas las aguas de lavado	90
Ósmosis inversa en una etapa de las aguas de lavado	90
Dos etapas de ósmosis inversa y tratamientos asociados	99

Sin embargo, el coste de las técnicas de concentración supone todavía una carga considerable para las industrias, que intentarán continuar empleando métodos antiguos menos eficaces pero más económicos. Por ejemplo, según un estudio personal sobre depuración de las aguas residuales de una fábrica de fertilizantes, se obtuvo un factor de 2,6 entre los costes totales instalados para un diseño sencillo y otro completo incluyendo estas últimas unidades de desmineralización y evaporación con objeto de reutilizar la mayor cantidad posible de agua y de recuperar los efluentes concentrados en forma de subproductos vendibles.

Para otros, por el contrario, las técnicas de conservación de agua y de disminución de descarga de aguas residuales podrían representar un ahorro importante en las inversiones de capital así como en los costes de operación.

Procesos específicos.

Es habitual utilizar una subdivisión de las operaciones y procesos involucrados en un sistema de tratamiento de aguas residuales en lo que se conoce por:

- Pretratamiento
- Tratamiento primario
- Tratamiento secundario
- Tratamiento terciario

Existe bastante confusión en la asignación de la operación u operaciones que integran cada tipo de tratamiento.

Pero la intención ha sido que cada tratamiento corresponda a la reducción de un tipo o grupo de contaminantes, según se definieron anteriormente.

De esta forma puede decirse que dichos tratamientos incluyen las operaciones y tratan de reducir el contenido en los contaminantes que se indican a continuación:

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.1. / .16..		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
	3	CAPITULO: CONTAMINACION DE LAS AGUAS	01	10	80

Tratamiento	Operaciones o procesos incluidos	Contaminantes que se pretenden separar
Pretratamiento	Reducción de tamaño Cribado Sedimentación	Materia sólida gruesa Aceite Sólidos sedimentables
Primario	Floculación Flotación con aire	Sólidos en suspensión
Secundario	Oxidación bioquímica	DBO, DQO
Terciario	Adsorción Intercambio iónico Electrodialisis Osmosis inversa	Sólidos disueltos Olor Compuestos orgánicos Cationes o aniones

Además de las operaciones y procesos citados, se manejan otros que no pueden incluirse en la clasificación anterior, como son neutralización, desinfección, precipitación química y tratamiento de lodos (para el último caso se contemplan el espesamiento, la filtración a vacío, la centrifugación, la incineración, el secado y la digestión biológica de lodos activos).

Debido a las dos razones apuntadas de confusión e imposibilidad de incluir algunos procesos y operaciones, la clasificación presentada tiende a abandonarse.

Siguiendo el texto clásico de Metcalf, es mejor hablar, en definitiva, de operaciones y de procesos unitarios. Las primeras se refieren a operaciones que aplican algún principio físico (sedimentación, filtración, etc.) y los segundos a procesos químicos (neutralización, precipitación) físico-químicos (adsorción) o bioquímicos (oxidación bioquímica, desinfección).

Diseño de plantas de tratamiento.

Existen grandes diferencias a la hora de diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales según se trate de las aguas procedentes de una fábrica en marcha o de una nueva instalación.

La primera diferencia surge de que en el primer caso se cuenta con la materia prima mientras que en el segundo, el caudal y la composición han de ser estimados. Esto supone una gran ventaja para aquellas, ya que diseñar especulando es siempre arriesgado, si no imposible.

La segunda diferencia, a favor en este caso de las plantas nuevas, es que estas se diseñan hoy en día

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERÍA AMBIENTAL	HOJA 2: 1 / . 17.		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
	E.O.I. MINER	CAPITULO: CONTAMINACION DE LAS AGUAS	01	10	80

teniendo presente los problemas del medio ambiente. Las fábricas antiguas no tuvieron en cuenta ese aspecto, responden a la época que podría llamarse del "orgullo por las chimeneas", y el diseño de los sistemas de tratamiento y depuración supondrá en muchos casos inversiones excesivas precisamente por ese concepto.

Muchas veces se pretende que el problema de la contaminación de las aguas se resuelva "fuera de límites de batería", cuando realmente nace de:

- una utilización no racional del agua en la industria
- fallos de proceso
- fallos de operación

El diseñador debe tener, por tanto, acceso a la planta de proceso para conocerlo exactamente y poder actuar en consecuencia.

Los criterios que deben seguirse para el diseño deben partir de la preparación de un estudio sobre las aguas residuales para establecer las cargas y caudales, localizar y definir las posibilidades de reducir el consumo de agua y/o reutilización, de recuperar productos o de reducir las fuentes de producción de aguas residuales y, para finalmente establecer un diagrama de flujo y un balance de materia de todos los contaminantes principales. Para ello deben seguirse las siguientes etapas:

- 1- Revisión del uso del agua y de las fuentes de contaminación. Deben definirse los tipos y duración de las operaciones industriales, por ejemplo operaciones discontinuas que descargan varias veces al día y operaciones en continuo.
- 2- Definir el aporte de primeras materias y las características de las aguas residuales para todos los procesos estudiados en la etapa 1.
- 3- Desarrollar el plazo de drenajes de la planta.
- 4- Elegir los puntos de medida y toma de muestras de las aguas residuales.
- 5- Instalar sistemas de medida de caudal.
- 6- Elegir los análisis que deben hacerse y su programación.

Los procesos discontinuos deben desmostrarse en muestras compuestas que abarquen la duración de cada descarga, proporcionalmente al caudal. De los procesos continuos pueden tomarse muestras compuestas proporcionales al caudal. La programación depende de la variabilidad de las características de las aguas residuales. Una programación normal para los distintos contaminantes es la que se indica a continuación :

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.1 / 18		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
E.O.L. MINER	3	CAPITULO: CONTAMINACION DE LAS AGUAS	01	10	80

PROGRAMA NORMAL DE MUESTREO

Característica ó contaminante	Período de acumulación de cada muestra compuesta, horas.	
	Aguas residuales muy variables	Aguas residuales poco variables
DBO	4	12
DQO	2	8
Sólidos en suspensión	8	24
Alcalinidad o acidez	1 *	8 ±
pH	Continua	4 ±
N y P	24	24
Metales pesados	4	24

* No se trata en este caso de muestra compuesta, sino de muestra instantánea, tomada a los intervalos que se indica.

La duración del período de análisis depende de la variabilidad en la composición y de la complejidad de las aguas residuales y puede ser de varios días a varios meses.

7- Interpretar estadísticamente los resultados obtenidos en los análisis y medidas de caudal.

La mejor forma de interpretar los resultados obtenidos es representar las curvas de probabilidad de concentración en mg/l para cada uno de los contaminantes estudiados en cada corriente de aguas residuales. La necesidad de tratamiento se deduce de la comparación de los valores obtenidos con los valores exigidos por la legislación para autorizar el vertido. Para contaminantes muy tóxicos se puede tomar como valor representativo de la corriente considerada el correspondiente al 95% de probabilidad. Cuando ese no sea el caso, el valor correspondiente al 50% de probabilidad es aceptable.

Por último se representarán las curvas de probabilidad de caudal máximo en kg/día para cada contaminante y corriente, utilizando los mismos criterios que para el caso de concentración, expuestos anteriormente. Cuando sea posible, las curvas de probabilidad deben referirse a la producción, esto es, cantidad de contaminante en kg por t de producto, con objeto de poder extrapolar a otros programas de fabricación.

8- Agrupar las distintas corrientes de aguas residuales por "familias" a efectos de segregación y tratamiento específico separado.

Con el trabajo anterior se puede contar con las bases de diseño de la planta de tratamiento necesaria en cada caso. El trabajo se completa con ensayos de "tratabilidad" en el laboratorio al objeto no sólo de comprobar experimentalmente la factibilidad de un proceso u operación para reducir la carga contaminante correspondiente, sino también para determinar los parámetros de diseño de la operación o proceso en cuestión (tiempo de contacto, temperatura, velocidad, etc.).

Todo lo anterior es válido como puede comprenderse fácilmente, para plantas industriales existentes.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.1/...19.		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
E. O. I. MINER	3	CAPITULO: CONTAMINACION DE LAS AGUAS	01	10	80

En el caso de nuevas plantas los caudales y composiciones de las aguas residuales producidas deben estimarse a partir de las experiencias acumuladas con plantas similares que utilicen el mismo proceso de fabricación. Como ya se indicaba antes, esto es muy arriesgado, desde el punto de vista técnica y, por tanto económico. Lo más aconsejable es diseñar los sistemas de tratamiento y depuración mínimos requeridos, dejando espacio para ampliación futura cuando ya se cuenta con la "materia prima", el agua residual, y por tanto con datos fiables sobre su cantidad y naturaleza.

4.1. RESIDUOS URBANOS.

La tendencia mundial a la producción de residuos sólidos es hacia el aumento, con la particularidad de que mientras se incrementa su volumen, disminuye su densidad. Las razones para explicar este fenómeno pueden encontrarse en el aumento en el empleo de productos envasados y empaquetados, la mejora de los estándares de vida, y en el uso cada vez más extendido de la calefacción central, entre otras.

Es conocido el aumento de la fracción papel en la composición de los residuos domésticos, y que, recientemente, los plásticos se incluyen como un ítem separado en el análisis de esa composición. Ambos factores son debidos al aumento indicado en la utilización de productos envasados. En Inglaterra se estimó que las tasas anuales de crecimiento en el empleo de materiales empaquetados entre 1969 y 1972, fué como sigue:

- Cartones, cajas y embalajes de cartón ondulado 3,8%
- Recipientes de vidrio 3,0%
- Bolsas, sacos y envoltorios de papel 1,8%
- Recipientes de hoja de lata 3,8%
- Plásticos 9,3%
- Película celulósica 2,8%

Se afirma que la producción mundial de plásticos se ha doblado cada cinco años durante las últimas dos décadas, pero no se tiene conocimiento exacto de su tasa de aparición como residuo; aproximadamente el 10% -como se indica más arriba- se convierte en residuo, la vida del resto es cuestionable.

4.2. RESIDUOS INDUSTRIALES.

Existe un número prácticamente inacabable de tipos de residuos sólidos industriales; cambian constantemente conforme se introducen nuestros procesos de fabricación y un residuo deja de serlo para convertirse en materia prima en otro ciclo. Esta situación hace muy difícil cualquier intento de clasificación. No obstante, en Inglaterra, por ejemplo, se realizó una encuesta en 1972, sobre 1.186 fábricas, y los residuos sólidos se clasificaron en los grupos que se indican a continuación (se expresan los porcentajes de cada grupo):

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	HOJA 2.1 /... 21.		
	1		FECHA		
E. O. I. MINER	4	CAPITULO: RESIDUOS SOLIDOS	01	10	80

<u>Tipo</u>	<u>%</u>
- Residuos de tipo general no contaminados por los de proceso.	10
- Residuos de procesos relativamente inertes	83,7
- Residuos de procesos inflamables	0,9
- Residuos ácidos o alcalinos ...	3,6
- Residuos tóxicos	1,8

Los residuos tóxicos industriales más característicos podrían ser:

- Lodos químicos
- Residuos de pinturas
- Alquitrán
- Residuos arsenicales
- Residuos conteniendo cianuros
- Residuos de berilio
- Residuos de pesticidas
- Residuos fotográficos
- Carburos
- Lodos conteniendo compuesto de cobre, cinc, cadmio y níquel
- Hidrocarburos aromáticos
- Disolventes orgánicos
- Lacas
- Lubricantes
- Ácido crómico
- Mezclas agua-queroseno
- Tricloroetileno
- Residuos aceitosos de la industria del petróleo
- Residuos de ácidos orgánicos
- Lodos de la destilación de alquitrán
- Lodos de fenol-formaldehido
- Residuos de nicotina
- Sulfuros
- Mercaptanos
- Residuos de alcaloides
- Sulfuro arsenioso
- Fluoruros
- Ácidos gastados
- Residuos de gasolina con plomo
- Residuos de alcoholeras
- Sulfato de beta-naftilamina

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.1 / .22.		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
E.O.I. MINER	4	CAPITULO: RESIDUOS SOLIDOS	01	10	80

- Diaminodifenilmetano
- Propil-isocianato
- Clorofenoles
- Cloro -aresoles

4.3. MÉTODOS DE TRATAMIENTO Y EVACUACION.

Los métodos de tratamiento y evacuación de residuos sólidos pueden dividirse en dos grandes categorías: aquéllos que son de práctica común; y los que todavía se encuentran en fase de desarrollo.

Entre los primeros se encuentran:

- vertederos controlados
- recuperación de terrenos
- incineración
- fabricación de "compost"

y entre los segundos:

- compactación
- pirolisis
- recuperación y recicló

Los sistemas basados en recuperación y recicló responden a la preocupación a nivel mundial sobre la tasa de consumo de materias primas. Existe una interrelación lógica entre el uso de materias primas y la producción de residuos que conduce, inevitablemente, a la cuestión del recicló. Debe imponerse un límite al suministro de materias primas hoy en uso, y aparte del empleo más eficaz que debe hacerse de ellas, y del recicló, queda solamente la búsqueda de nuevas materias primas.

Lógica y moralmente, por tanto, se presentan buenas razones para la recuperación o el recicló de materias primas a partir de los residuos. Sin embargo, según los planteamientos actuales de la economía, los argumentos resultan débiles. Ni las autoridades locales ni los fabricantes serán fácilmente persuadidos para extraer materias primas a partir de procesos poco rentables; bajo esas circunstancias sólo las ayudas del gobierno central, consecuente con una política de conservación, podrán presumiblemente lograr un recicló a gran escala.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2, 1/.. 23.		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	F E C H A		
E.O.I. MINER	5	CAPITULO: CONTROL DEL RUIDO	01	10	80

5.1. FUENTES DE RUIDO

Otro aspecto muy importante a tener en cuenta cuando se habla de contaminación es el ruido generado en las plantas de proceso.

Las ondas de presión audibles originadas por cualquier fuente de vibraciones mecánicas constituyen el sonido. El ruido se considera como un sonido no deseado por la persona que lo recibe.

El tiempo de exposición al ruido y el nivel sonoro, son las variables de la función dosis de ruido que se introduce para evaluar sus efectos sobre el oído humano.

En una planta industrial existen multitud de fuentes que crean en muchos casos niveles elevados. Como consecuencia de ello, en determinadas áreas de trabajo el personal puede llegar a percibir dosis de ruido excesivas que influyen en su rendimiento y provocan pérdidas auditivas e incluso la sordera profesional. Además, cuando la planta está ubicada en las proximidades de zonas residenciales, el ruido es origen de posibles molestias en las personas que las habitan.

El control del ruido persigue, por una parte, limitar la dosis de ruido percibida por los operadores a valores permisibles por las regulaciones, y por otra, que la incidencia de las fuentes que se controlan no originen un nivel global en la vecindad, que exceda al estipulado en la disposiciones legales de la zona.

Cuando se estudia el problema del ruido, lo primero que debe hacerse es localizar las fuentes productoras del mismo. Para ello, mediante una lista de equipos que incluya sus características principales y con un plano de implantación, se sitúan las fuentes de ruido que deben considerarse. El paso siguiente es la evaluación de los niveles que producen individualmente. Esto último se realiza por medición directa con sonómetros de precisión y filtros de octavas (para los casos de plantas en funcionamiento) y, por cálculo ya que existen métodos de estimación según el tipo de fuente de que se trate (ventiladores, quemadores, válvulas de control, bombas, compresores, etc.) o utilizando valores de archivo para equipos similares y funcionando en condiciones análogas y finalmente por datos suministrados por los vendedores, para el caso de plantas en proyecto.

Cuando se vaya a realizar un estudio completo que considere la totalidad de las fuentes, se prefiere emplear los valores del nivel de potencia sonora en lugar de los de presión sonora por su mayor sencillez en los cálculos de la atenuación por distancia.

5.2. PLANIFICACION DEL CONTROL

Una vez se dispone de los niveles que producen o pueden producir cada una de las fuentes, el problema del ruido se aborda de forma distinta según la planta sea existente o esté en fase de diseño. En el primer caso, el control del ruido se limita a aplicar las medidas de atenuación más oportunas sobre los equipos y a proteger al personal si fuera necesario. Si por el contrario se trata de la fase de diseño de un proyecto es conveniente realizar una planificación previa que optimice el empleo de las citadas medidas de atenuación.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.1 / ... 24		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
E.O.I. MINER	5	CAPITULO: CONTROL DEL RUIDO	01	10	80

Con los niveles estimados para cada una de las fuentes se procede a calcular en diferentes puntos de la planta y en los alrededores el nivel global que se producirá. Cuando los valores resultantes exceden de los permisibles se debe entonces actuar sobre los focos sonoros. En primer lugar se estudia la posibilidad de introducir variaciones en el plano de implantación previsto, separando cuando es factible las fuentes más ruidosas para evitar que se den zonas con niveles en exceso. Luego se detectan las fuentes de mayor importancia por su contribución en el nivel global. La compañía de Ingeniería juega en este aspecto del proyecto un papel decisivo pues decide qué fuentes deben atenuarse y qué frecuencias son las que más influyen en el espectro. Como resultado de este análisis la ingeniería prepara unas especificaciones sobre niveles de ruido permisibles en cada tipo de equipo. De esta forma, el control de ruido pasa a ser un factor más a tener en cuenta en las tabulaciones técnicas de los equipos que se van a comprar.

5.3. MEDIDAS DE ATENUACION.

Par poder cumplir con las especificaciones preparadas, resulta necesario en muchos casos acudir a medidas de atenuación que reduzcan los niveles hasta los valores requeridos. Por ello los vendedores se ven forzados a introducir variaciones a los diseños convencionales en los equipos de su suministro.

Se pueden conseguir mejoras intrínsecas a la máquina modificando el diseño; es el caso de las válvulas especiales, de los motores eléctricos silenciosos, etc. Cuando no es posible alterar el diseño se intenta reducir el ruido impidiendo su propagación. Para ello se emplea predominantemente el aislamiento por medio de cerramientos y recubrimientos acústicos. Otra medida muy eficaz es dificultar la propagación del ruido por las estructuras instalando montajes antivibratorios. Para los escapes a la atmósfera se colocan silenciadores que disipan la energía acústica en forma de calor. Cuando los equipos están instalados en el interior de locales cerrados puede atenuarse el nivel colocando paneles absorbentes.

5.4. PROTECCION PERSONAL.

Sólo debe acudirse a esta medida cuando ya no es posible actuar sobre las fuentes, o si a pesar de haber efectuado las modificaciones oportunas siguen resultando niveles excesivos de ruido. Para poder proteger al personal se debe en primer lugar distribuir la planta en zonas de acuerdo al nivel sonoro que existe en cada una. Cada parcela se identifica por un nivel global en dB (A y por el tiempo de exposición permisible. La protección personal se reduce entonces a actuar sobre las variables que determinaron la dosis de ruido. El empleo de protectores auditivos actúa sobre el nivel global de la zona reduciéndolo en el oído hasta el valor deseado y la rotación de puestos de trabajo actúa sobre la variable tiempo de exposición.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2:1/. 25..		
	1	TEMA: PROCESOS CONTAMINANTES	FECHA		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO: CONCLUSION	01	10	80

Qué actuación se presenta ante nosotros?. Tenemos una población que aumenta a tal proporción que se oye hablar con frecuencia de la "explosión de la población". La población del mundo se ha doblado desde el final del siglo pasao hasta 1970 y, se espera que se doble de nuevo hacia el año 2.000. El estándar de vida de esa población está aumentando asimismo. Uno de los resultados inmediatos de esta situación es un incremento fabuloso en la demanda de todo tipo de productos de consumo. Esto significa más viviendas, más automóviles, y en particular, un aumento en la demanda de energía. O sea más plantas de todos los tipos: refinería, papeleras, centrales de energía, etc., y en consecuencia, la agudización general de los problemas medioambientales.

Las demandas mundiales de energía aumentarán en la década 1970-1980, según un estudio publicado en el Oil and Gas Journal en 1969 según los siguientes factores:

- Petróleo 1,8
- Gas natural 1,7
- Carbón 1,1
- Nuclear 10,8

correspondiendo el consumo total equivalente en 1980 a 159.000.000 de barriles diarios de crudo, frente a 99.000.000 para 1970.

En consecuencia la situación que se nos presenta es realmente preocupante. Los factores que nos han conducido a una situación crítica del nivel de contaminación ambiental en algunas áreas del planeta están aumentando a tal velocidad que su efecto podría conducir rápidamente a zonas urbanas que resultarían inadecuadas para vivir, a no ser que se tomar urgentemente las acciones correspondientes. Más concretamente, deben tomarse acciones adecuadas, ya que las tomadas simplemente para "hacer algo" normalmente conducen a efectos beneficiosos escasos. Es importante, en consecuencia, actuar con perspectiva.

Los ingenieros "ambientalista" deben este reto, aplicando a la industria la siguiente tecnología:

- elección adecuada del emplazamiento, dentro de la panorámica general de ordenación del territorio
- estudios previos del emplazamiento previamente elegido en lo que se refiere a condiciones originales ambientales de calidad del agua, nivel de contaminación atmosférica y nivel de ruido.
- elección del proceso más adecuado, tanto desde el punto de vista de su rendimiento como de la mínima producción de residuos, o en su defecto de sus mayores posibilidades de recuperación y/o reutilización de subproductos,
- agotadas las posibilidades en cuento a "vertido cero", es necesario diseñar y construir los sistemas más idóneos de tratamiento y depuración de residuos, de nuevo sin olvidar los conceptos de reutilización y recuperación.

TEMA 2

CONTAMINACION ATMOSFERICA

ELABORADO POR :

J. A. CANTELI GUTIERREZ

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./9...		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER				01	10	80

INDICE

	<u>Pág.</u>
1.- CONTAMINACION ATMOSFERICA. CONCEPTOS GENERALES. CLASIFICACION.	1
2.- CONTAMINANTES PARTICULADOS	11
3.- CONTAMINANTES GASEOSOS	16
4.- REACCIONES DE LOS CONTAMINANTES EN LA ATMOSFERA. SMOG FOTOQUIMICO	22
5.- LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	29
6.- PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA	44
7.- TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION	71
8.- PROCESOS Y SISTEMAS DE CONTROL. RENDIMIENTO, SELECCION Y APLICACION DE COLECTORES	103
9.- EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	113
10.- DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	144
11.- DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	160
12.- DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	185
13.- DEPURACION DE GASES POR FILTROS DE TEJIDO	202
14.- DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	210
15.- VENTILADORES	242
16.- LEGISLACION DE APLICACION	264
17.- BIBLIOGRAFIA	274

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2, 2, /, 1.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER.	1	CAPITULO : CONTAMINACION ATMOSFERICA. CONCEPTOS GENERALES. CLASIFICACION.	01	10	80

1.1. CONCEPTOS GENERALES

El término "contaminación atmosférica" ha sido definido por el "Engineers Joint Council" norteamericano, como la "presencia en la atmósfera de uno o más contaminantes, tales como polvos, humos metálicos, gases, nieblas, olores, humos, o vapores, en cantidades, de características y duración tales como para ser perjudiciales para la vida humana, vegetal o animal, o para las propiedades, o que interfieren excesivamente con el disfrute confortable de la vida y de los bienes".

En el Anexo I de la Orden del Ministerio de Industria de 18 de Octubre de 1976, publicada en el B.O.E. nº 290 de 3 de Diciembre del mismo año, se define "contaminante de la atmósfera" como "partículas sólidas o líquidas, vapores y gases, contenidos en la atmósfera, que no forman parte de la composición normal del aire, o que están presentes en cantidades anormales".

De ambas definiciones se deduce que la contaminación de la atmósfera es una alteración de su composición, transitoria o perenne, con efectos no deseables sobre las diferentes formas de vida de nuestro planeta o sobre los bienes y propiedades del ser humano. Pero se plantea la cuestión ¿cuál es la composición normal de la atmósfera?. Aunque pueda aceptarse una estabilidad relativa en la composición de la envoltura gaseosa de la tierra durante el corto periodo de tiempo de nuestra civilización actual, es conveniente, al considerar las relaciones entre el hombre y el medio que le rodea, tener en cuenta la naturaleza de las interacciones entre los organismos vivos y la atmósfera durante el tiempo que se prolonga la evolución de nuestra especie. La composición del aire ha sufrido grandes cambios cualitativos en los aproximadamente dos mil millones de años desde que la primera unidad autorreproductora anaeróbica comenzó a vivir.

Es evidente que las primeras células vivientes no podrían haber aparecido o continuado su existencia en una atmósfera con la composición química que nosotros actualmente consideramos normal y necesaria para nuestra vida. El ambiente gaseoso primitivo estaba, probablemente, libre de oxígeno, y según las evidencias existentes el oxígeno se ha ido acumulando como consecuencia de los procesos fotosintéticos de las primeras especies anaeróbicas, constituyendo para ellas esta acumulación de oxígeno, una forma de contaminación atmosférica tan catastrófica como las emisiones de SO₂, NO₂, CO, etc., lo son para las formas de vida actual y, especialmente, para el hombre.

Además de la denominada "revolución del oxígeno", se admite que la atmósfera de la tierra ha sufrido una secuencia de cambios cualitativos, fundamentalmente variaciones sustanciales en el contenido de CO₂, durante el largo periodo de la prehistoria. El conjunto de datos sobre los que se basan tales cambios derivan del análisis de los fósiles y del registro de los cambios adaptativos en los vegetales y animales aparentemente de acuerdo con las variaciones ambientales. Es decir, los organismos vivientes exhiben una capacidad de adaptación frente a los cambios graduales de la composición atmosférica.

Por el contrario, existen evidencias de que ciertas especies, incluso órdenes dominantes de vegetales y animales, han desaparecido o disminuido considerablemente como consecuencia de cambios ambientales sucedidos demasiado rápidamente con respecto a las velocidades disponibles del mecanismo de adaptación.

Esta es la piedra angular del conflicto del hombre actual frente al cambio ambiental. Nuestro largo periodo de vida en contacto con la atmósfera cambiante, provoca unos cambios efectivos en un tiempo mucho más corto que las numerosas generaciones requeridas por nuestro organismo para ajustar sus mecanismos adap

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./..2..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	1	CAPITULO: CONTAMINACION ATMOSFERICA. CONCEPTOS GENERALES. CLASIFICACION.	01	10	80

tativos. Afortunadamente, la especie humana posee propiedades y capacidades cognitivas para iniciar acciones capaces para prevenir el deterioro de los productos de su existencia biológica y económica.

No obstante, la iniciación de estas capacidades es en sí misma un tipo de adaptación que requiere tiempo, y un análisis de los resultados entre la velocidad de cambio de la atmósfera y la velocidad de las reacciones de defensa puede conducir, bien a conclusiones alentadoras, o desalentadoras.

La contaminación de la atmósfera ha sido una consecuencia indeseable de la actividad del hombre, presumiblemente desde que el primer hombre de las cavernas quemó una rama de árbol. La historia de la contaminación es la historia de los combustibles, del incremento de la industrialización, y del crecimiento de las aglomeraciones urbanas; y fue precozmente profetizada por Teofrasto (361 a.C.), "las sustancias fósiles llamadas carbón arderán durante largo tiempo; pero el olor es molesto y desagradable".

La calidad de la atmósfera, de la que dependen las formas vivientes terrestres, sólo ha sido reconocida como una variable importante desde hace unas pocas décadas. La primera referencia que poseemos de las consecuencias de la contaminación atmosférica, provienen del poeta Horacio (65 a.C.) que se lamentaba de que los altares de Roma estaban ennegrecidos por el humo. Durante los primeros tiempos de la historia, la madera era la única fuente de energía, y su dependencia es la responsable de la lenta evolución de los procesos industriales.

Pero el hombre descubre la energía potencial que guarda el carbón, y lo extrae del fondo de la corteza en grandes cantidades, con lo que desplaza gradualmente a la madera, para calentar sus hogares en los agrupamientos de viviendas, creándose una atmósfera de humo sulfuroso e impurezas encima de sus ciudades. A finales del siglo XIII, ante la situación creada en Londres, el rey Eduardo I promulga la primera ley de que tenemos noticias, prohibiendo el uso del carbón debido a los gases y humos que se producen en su combustión y como consecuencia de la creencia de que los alimentos cocinados sobre carbón podían causar enfermedades e, incluso, la muerte.

En 1.306, el propietario de una industria que había desobedecido la real ley, fue juzgado, declarado culpable y, consecuentemente, decapitado. Es la primera penalidad registrada como consecuencia de violar una ley anticontaminación. No obstante, el uso del carbón prosigue y la humanidad se resigna a aceptar una atmósfera contaminada como parte de la vida urbana.

Desde el siglo XIV hasta el principio del XX, la contaminación de la atmósfera por los humos y gases del carbón ocupan el centro de la escena casi exclusivamente y, aún en muchas áreas industrializadas del mundo, es la fuente emisora predominante.

La industrialización y el desarrollo tecnológico añaden una segunda dimensión a la contaminación de la atmósfera. El carbón extraído del subsuelo no es suficiente para cubrir la demanda de energía, y los combustibles fósiles, e.d., el petróleo, recién descubierto, es aprovechado para rellenar las necesidades, cada vez mayores, de energía barata. Se desarrollan y perfeccionan los equipos que suministran, quemando petróleo, energía y electricidad para alumbrar nuestros hogares y mover las máquinas. Las refineries de petróleo se levantan en las proximidades de los puertos y de los campos petrolíferos.

La energía obtenida del petróleo y del carbón, es transportada hasta la proximidad de los yacimientos minerales, permitiendo beneficiar los metales necesarios para la producción de maquinaria y equipos. Coincide con este desarrollo el aprovechamiento industrial de las reacciones químicas de síntesis que permiten obte-

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 3.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	1	CAPITULO : CONTAMINACION ATMOSFERICA. CONCEPTOS GENERALES. CLASIFICACION.	01	10	80

ner grandes cantidades de los productos necesarios para que nuestra vida sea más agradable y cómoda.

Durante el avance del desarrollo industrial se ha dado una escasa atención a los efectos de los productos de desecho sobre el ambiente. Algunas personas aún tienden a asimilar contaminación con prosperidad, mostrando con orgullo los penachos de las chimeneas como un símbolo de desarrollo económico. Finalmente, el automóvil ha añadido una tercera dimensión a la contaminación de la atmósfera.

El "smog" es un término sugerido en 1.911, H.A. Des Voeux', para describir la mezcla de smoke y fog - que se desplegaba sobre el cielo de Londres y de otras ciudades inglesas. Solamente en el invierno de 1.909 en Glasgow, se produjeron 1.603 muertes atribuibles a los efectos perniciosos del smog.

A actualmente, el término smog se utiliza sin embargo para referirse a los productos de reacciones fotoquímicas, que irritan las mucosas oculares, que tienen lugar a partir de las emisiones de los automóviles y - que cubren, como una manta, a ciertas ciudades como Los Angeles, cuando las condiciones metereológicas producen una masa de aire estancada.

Hace ya más de 20 años que existen evidencias de que los datos de la aparición de daños en los vegetales, típicos del smog fotoquímico próximo a las grandes ciudades del mundo, podrían ser correlacionados con los datos que muestran que el uso de gasolina ha alcanzado un valor crítico. La contaminación del aire es, por tanto, un problema nuevo y actual, pero de vital importancia, que no debemos aceptar como un lógico tributo al desarrollo. En este sentido, en la totalidad de los países desarrollados, se están realizando grandes - esfuerzos económicos para combatir racionalmente los efectos de deterioro de la atmósfera. El primer punto de acuerdo entre las naciones, debe ser unos parámetros de calidad del aire, obtenidos sobre bases científicas sólidas, que sirvan como punto de partida para determinar las medidas de control. Para llegar a esta situación es necesario interpretar e integrar los resultados de numerosas investigaciones en disciplinas tan diversas como :

- Química : que suministra métodos para determinar la concentración de los contaminantes en la atmósfera, e informa de las interacciones químicas de los contaminantes.
- Meteorología : que nos informa de las condiciones que puedan conducir a masas de aire estancadas con acumulación de contaminantes, y estudia los fenómenos de dispersión de las emisiones contaminantes.
- Ingeniería : que efectúa los desarrollos tecnológicos necesarios para controlar la contaminación en el foco emisor.
- Toxicología : que nos suministra información sobre los efectos fisiológicos, bioquímicos y patológicos - de concentraciones conocidas de contaminantes sobre animales de experimentación, o sobre el hombre.
- Epidemiología : que correlaciona la información sobre la salud de la población con los niveles conocidos de contaminación a que están expuestos.
- Patología vegetal : que da información sobre los efectos de los contaminantes sobre la vegetación.
- Economía : que intenta, por una parte, fijar los costos de la contaminación en términos de corrosión de materiales, de pérdidas de rentas por daños a las cosechas y por otros efectos sobre la economía, y, por otra parte, evaluar los costos del control de la contaminación.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2/.4..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	1	CAPITULO: CONTAMINACION ATMOSFERICA. CONCEPTOS GENERALES. CLASIFICACION.	01	10	80

El grado actual de concienciación de la población hacia los problemas de la contaminación, se debe a las constantes referencias, no siempre exactas y bien intencionadas, que efectúan los denominados medios de comunicación social. No obstante esta demagogia, la contaminación atmosférica es un problema grave en ciertas circunstancias, en las que la unión de factores tales como condición geográfica, emisión a la atmósfera de grandes cantidades de contaminantes y condiciones climatológicas adversas, han dado lugar a episodios o catástrofes ya clásicas y famosas. Entre ellas, cabe destacar los desastres ocurridos en el Valle del Mosa, en Bélgica; en la ciudad de Donora, de Pennsylvania; en Poza Rica, de Méjico; en Londres, y más recientemente en la localidad italiana de Seveso.

El primer episodio grave promovido por contaminación atmosférica ocurrió en el Valle de Mosa, en Bélgica, durante los cinco primeros días de Diciembre de 1.930, cuando enfermaron un gran número de personas, de las que 60, la mayoría personas de edad avanzada con antecedentes de padecimientos cardíacos y pulmonares, murieron. Los síntomas fueron los clásicos de una irritación respiratoria, e. d., dolor torácico, tos, respiración dificultosa, e irritación de las mucosas respiratorias y oculares. El área del Valle del Mosa, - donde ocurrió la catástrofe, es una zona de aproximadamente 24 km. de longitud por 1 km. de ancho, rodeada por una serie de colinas de unos 100 metros de altura, en la que existían en aquellas fechas un total de - 25 industrias, incluyendo 4 grandes altos hornos, con un total de 5 plantas de coq, 3 siderometalúrgicas, 4 centrales eléctricas, 6 industrias de fabricación de vidrio y cerámica, 3 plantas de fabricación de cal, 3 metalúrgicas de beneficio de cinc, una planta de ácido sulfúrico y una de fertilizantes. La fuente energética primaria de todas estas industrias era el carbón y, además, la zona industrial estaba próxima a diversos núcleos urbanos, que también utilizaban carbón en sus hogares de combustión, con un tráfico denso de ferrocarriles y automóviles.

La condición climatológica durante el período fue anticiclónica, caracterizada por una presión atmosférica alta y una débil corriente de aire, lo que motivó una acumulación de los numerosos contaminantes, aproximadamente unos 37, emitidos por el núcleo industrial y urbano. Tras la catástrofe, los investigadores y autoridades intentaron deducir de los datos médicos, meteorológicos y ambientales el, o los, contaminantes responsables, llegando a la conclusión de que los contaminantes responsables eran los compuestos de azufre (SO_2 , SO_3 y SO_4H_2 fundamentalmente), sin olvidar que los posibles efectos sinérgicos con otros contaminantes podrían haber jugado un papel importante.

El episodio de Donora, Pennsylvania, ocurrido en los últimos días del mes de Octubre de 1.948, produjo 20 muertos y unos 6.000 enfermos. En los alrededores de la localidad había cuatro grandes industrias siderometalúrgicas, incluyendo altos hornos y plantas anexas, una gran industria para la metalurgia del cinc, una de ácido sulfúrico, una de fabricación de vidrio, una planta eléctrica y una línea de ferrocarril cercana. Los investigadores concluyeron que los efectos se habían debido a una combinación de las acciones del anhídrido sulfuroso, y sus productos de oxidación, y de la materia particulada.

El desastre de Poza Rica, en Méjico, en Noviembre de 1.950, arrojó un saldo de 22 muertos y 320 personas hospitalizadas, como consecuencia de un escape masivo de ácido sulfhídrico promovido por una avería y una mala manipulación de una planta de desulfuración.

Del 5 al 8 de Diciembre de 1.952, ocurrió en Londres el cuarto, y el peor, de los episodios de contaminación atmosférica, coincidiendo con un largo período de smog que culminó con unas condiciones climatológicas de inversión de bajas temperaturas, humedad relativa alta y una casi completa ausencia de viento. Este es el primer caso del que se conocen datos analíticos de la atmósfera anteriores, coetáneos, y posteriores a la catástrofe. En el periodo de 15 días anteriores al 5 de Diciembre, el nivel de SO_2 osciló entre 0'09 y 0'33.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 5		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	1	CAPITULO : CONTAMINACION ATMOSFERICA. CONCEPTOS GENERALES. CLASIFICACION.	01	10	80

ppm, con un valor medio de 0'15 ppm (aproximadamente $390 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y la concentración de materia particulada en suspensión osciló entre 0'30 y 0'84 mg/m^3 , con un valor medio de 0'50 mg/m^3 .

Durante los días del episodio de contaminación, los niveles de SO_2 y materias particuladas suspendidas se elevaron hasta $3.458 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $4'46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Los efectos de este episodio se hicieron notar una semana después, del 13 al 20 de Diciembre, período en el que produjeron 3.000 defunciones más que las previstas como normales para ese período, fundamentalmente entre personas con más de 45 años de edad con antecedentes de padecimientos cardíacos y pulmonares, siendo los síntomas de irritación del tracto respiratorio observados similares a los de otras ocasiones.

Más recientemente, en el mes de Julio de 1.976, en Seveso, Italia, como consecuencia de un fallo en el control de temperatura en un reactor que obtenía triclorofenol, durante la parada habitual del fin de semana, se originó una reacción secundaria espontánea exotérmica, lo que condujo a la formación de 2, 3, 7, 8 tetraclorodibenzo-p-dioxina con un aumento considerable de la temperatura y presión en el reactor, que hizo saltar el disco de seguridad de una válvula de purga, colocada directamente al exterior, lo que permitió que una nube de gases se esparciera por una zona de la fábrica y, posteriormente, contaminara 300 hectáreas de terreno circundante ocupado por la misma población de Seveso, otras industrias y campos de cultivo.

Las características físicas y químicas de la 2, 3, 7, 8-TCDD, especialmente su insolubilidad en agua, baja tensión de vapor, y estabilidad química, hizo que aún muchos días después de la emisión, el terreno se encontrase contaminado y se produjese exposición y absorción por parte de animales y personas. En total, y como consecuencia de una política de ocultamiento de los hechos por la dirección de la factoría, se intoxicaron 176 operarios y cerca de 5.000 personas ajenas a la industria.

Los síntomas principales de la intoxicación en las personas expuestas han sido de cloracné, que se ha manifestado con pústulas y ulceraciones de lenta y difícil curación, alteraciones dérmicas diversas, tales como hiperpigmentación, seborreas y eritema, caída del cabello, crecimiento anormal del vello, desórdenes nerviosos centrales y periféricos con alteración de la capacidad auditiva, olfativa y del tacto, alteración neurítica degenerativa, disfunción hepática, renal, gastrointestinal y cardíaca, porfiria cutánea y porfinuria, alteración de las funciones tiroidea y pancreática y un síndrome de neurastenia con disminución del poder de concentración, memoria, pérdida del interés, desórdenes del sueño, inestabilidad emocional, ansia o irritabilidad y disminución de la libido e impotencia.

Quedaba todavía por comprobar si la 2, 3, 7, 8-TCDD posee en la raza humana la capacidad teratogénica que ampliamente ha demostrado en animales de laboratorio, así como muertes del embrión en el útero y disminución del desarrollo fetal. Estas sospechas llevaron al gobierno italiano a permitir que las mujeres en período de gestación, que podrían haber sido afectadas, pudieran elegir la probabilidad de interrumpir el embarazo.

Aunque estos casos históricos, en su mayoría, se han producido como consecuencia de emisiones industriales continuas o accidentales, se admite que no son las industrias directamente la principal fuente de contaminación de la atmósfera. En la Tabla 2.1.1. se muestra una estimación aproximada del porcentaje de la carga contaminante con que contribuyen las diversas fuentes, efectuada sobre una base de cálculo de la totalidad de Estados Unidos, pero que, en principio, se admite como válida para otras naciones industrializadas.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / . 6 . .	
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA	
E. O. I. MINER	1	CAPITULO: CONTAMINACION ATMOSFERICA. CONCEPTOS GENERALES. CLASIFICACION.		

TABLA 2.1.1.

PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACION

Fuente	% de toneladas totales emitidas
Transporte	60
Industria	18
Generación de energía eléctrica	13
Climatización	6
Manipulación de residuos	3

1.2. CLASIFICACION

Cualquier circunstancia que aumente o disminuya los constituyentes normales del aire y pueda alterar las propiedades físicas y químicas del aire suficientemente para ser detectada por los ocupantes del medio. Esta podría ser una definición válida para el término "contaminante". Otra definición que puede admitirse es "cualquier sustancia que adicionada en suficiente concentración a la atmósfera puede producir un efecto mensurable sobre el hombre, animales, la vegetación, o sobre los materiales.

Contaminantes pueden ser, por tanto, cualquier tipo de compuesto químico natural o sintético capaz de ser lanzado al aire, bien en forma de partículas sólidas, de pequeñas gotitas líquidas, de vapores, o de gases, o en diversas mezclas de las formas anteriores.

Numerosas han sido las clasificaciones que de la contaminación atmosférica, o mejor dicho, de los contaminantes, se han realizado tomando como criterio, bien la cantidad de toneladas que se emiten, el origen de los contaminantes, o la tipología de efectos producidos.

Se admite que los cinco principales contaminantes son: el monóxido de carbono, los óxidos de azufre, los hidrocarburos, la materia particulada y los óxidos de nitrógeno. Consecuentes en esta afirmación, son los valores que se reflejan en la Tabla 2.1.2., según datos recogidos por la Environmental Protection Agency (E. P.A.) en los Estados Unidos.

Desde el punto de vista de su origen, los contaminantes pueden dividirse en dos grupos. Por contaminantes "primarios" se entienden aquellos emitidos directamente por fuentes o focos identificables, mientras que en el grupo de los contaminantes "secundarios" se encuadran los que se originan en la misma atmósfera, bien por reacción entre dos o más contaminantes primarios o con los constituyentes normales del aire, con o sin la intervención de procesos de fotoactivación. Entraña una gran dificultad distinguir tras el muestreo y análisis el origen de los diferentes contaminantes, ya que en muy escasas ocasiones retienen su estado físico y su composición química tras su permanencia en la atmósfera, como consecuencia de las reacciones térmicas y fotoquímicas, algunas veces catalizadas por los gases o superficies líquidas y sólidas, lo que suministra a la atmósfera un caracter dinámico, constantemente en cambio.

No obstante, es posible normalmente determinar con un grado de seguridad razonable los tipos y cantidades

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./...7...		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	1	CAPITULO: CONTAMINACION ATMOSFERICA. CONCEPTOS GENERALES. CLASIFICACION.	01	10	80

de contaminantes emitidos por una fuente determinada. Existe un gran volumen de información sobre las especies químicas y su estado físico que son emitidas por las diferentes fuentes naturales y artificiales de contaminación. Estos datos y el conocimiento de las prolijas reacciones en cadena que pueden tener lugar, nos permiten efectuar unas acciones tendentes a evitar los efectos finales de la contaminación, controlando las emisiones primarias en la misma fuente de emisión.

TABLA 2.1.2.

EMISION ESTIMADA DE CONTAMINANTES EN 1970
(Millones de toneladas)

Fuente	CO	Mat. Partic.	SO _x	HC	NO _x
Transportes	111,0	0,7	1,0	19,5	11,7
Industria	11,4	13,1	6,0	5,5	0,2
Combustión de petróleo en fuentes fijas	0,8	6,8	26,5	0,6	10,0
Manipulación de desechos	7,2	1,4	0,1	2,0	0,4
Actividades diversas	16,8	3,4	0,3	7,1	0,4
Total	147,2	25,4	33,9	34,7	22,7
Porcentaje	55,7	9,6	12,8	13,1	8,6

1.2.1. Contaminantes primarios

Las emisiones primarias son normalmente clasificadas teniendo en cuenta simultáneamente los conceptos de finitorios de su constitución química, estado físico y cantidad emitida. Generalizando, se engloban en ocho - grupos.

Partículas sólidas inferiores a 100 μ .

Se incluyen en este grupo los aerosoles constituidos por partículas sólidas de diámetro equivalente menor de 100 μ , formados por partículas de metales, carbón, alquitrán, resinas, polen, hongos, bacterias, óxidos, nitratos, cloruros, sulfatos, fluoruros, silicatos, carbonatos y una multitud de otras especies de la totalidad de familias químicas existentes. Por su naturaleza, dispersan la luz de acuerdo con las leyes físicas - que relacionan la longitud de onda y el tamaño de partícula. Sobre su superficie se producen fenómenos de catálisis, condensación y coalescencia, y de acuerdo con composición química dan lugar a reacciones tóxicas en especies animales y vegetales, corroen estructuras metálicas o arquitectónicas, y si son radiactivas, aumentan la dosis radiactiva, dando lugar a procesos genéticos anormales. Finalmente, por efecto de las leyes gravitacional y atracción electrostática, manchan y ensucian los vestidos, edificios e individuos.

Partículas sólidas superiores a 100 μ .

Causan el mismo tipo de problemas que las anteriores, aunque en menor grado, ya que su mayor masa permite una más rápida deposición por efecto de la gravedad, los mecanismos biológicos de defensa evitan más

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 22 / 8.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	1	CAPITULO : CONTAMINACION ATMOSFERICA. CONCEPTOS GENERALES. CLASIFICACION.	01	10	80

eficientemente su penetración al sistema pulmonar humano o animal, y que su mayor masa favorece en menor grado las interacciones con otros contaminantes. Por el contrario, su mayor capacidad de deposición hace a este tipo de partículas más molestas por su efecto de ensuciar las superficies, a escasa distancia de su foco de emisión, en mayor proporción al no ser posible su dispersión por las corrientes de aire.

Compuestos de azufre.

Entre los compuestos de azufre cabe mencionar el SO_2 , SO_3 , SH_2 y mercaptanos. Los óxidos de azufre han sido uno de los contaminantes más ampliamente estudiados como consecuencia de su fundamental contribución a los episodios de contaminación urbana (Valle del Mosa, Donora y Londres); se origina como consecuencia de los compuestos de azufre que existen en el carbón y en el petróleo. El SH_2 y los mercaptanos se liberan en diversos procesos industriales, fundamentalmente en la fabricación de pulpa de papel y procesos petroquímicos y dan lugar normalmente a molestias olfativas.

Compuestos orgánicos.

Las sustancias orgánicas encontradas en mayor cuantía en los ambientes urbanos son los diversos tipos de hidrocarburos, fundamentalmente alifáticos saturados e insaturados y aromáticos monocíclicos y polinucleares, junto con una extensa variedad de derivados oxigenados y halogenados. Son emitidos en forma de vapor, gotículas líquidas y partículas sólidas, dando lugar a molestias olfativas e irritativas, e incluso los aromáticos polinucleares son carcinógenos para el hombre.

Componentes de nitrógeno.

Los más abundantemente encontrados son el óxido nítrico (NO), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el amoníaco. El primero se forma en los procesos de combustión por oxidación del nitrógeno atmosférico a las altas temperaturas del proceso, mientras que el segundo es emitido por ciertos procesos industriales y se forma también a través de una reacción fotoquímica entre el NO y el ozono atmosférico. Sus efectos fundamentales se deducen de su participación en los fenómenos atmosféricos de formación del denominado "smog fotoquímico".

Oxidos de carbono.

El monóxido y el dióxido de carbono se liberan a la atmósfera en grandes cantidades respectivamente, como consecuencia de los procesos de combustión incompleta y completa de los materiales combustibles, carbón y petróleo, y de cualquier tipo de material orgánico.

El monóxido de carbono, un 80% del cual se forma como resultado de utilización incompleta del carbón y de la gasolina, no sufre ninguna transformación atmosférica e interfiere notablemente en el proceso respiratorio disminuyendo la capacidad de transporte de oxígeno por la hemoglobina, desde el alveolo pulmonar al nivel subcelular.

Compuestos halogenados.

Los ácidos clorhídrico y fluorhídrico, y los fluoruros, liberados en procesos industriales y metalúrgicos; con corrosivos e irritantes del sistema pulmonar, y ciertos fluoruros metálicos poseen propiedades tóxicas para los vegetales, el ganado y el hombre.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2, 2, / 9.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	1	CAPITULO : CONTAMINACION ATMOSFERICA. CONCEPTOS GENERALES. CLASIFICACION.	01	10	80

Compuestos radiactivos.

Con la excepción de la deposición de nubes de material radiactivo procedentes de explosiones atómicas bélicas o experimentales, este tipo de contaminantes aún no han alcanzado un problema práctico de la entidad de los anteriores. No obstante, con el mayor uso de la energía nuclear y la aplicación industrial y médica de los isótopos, es muy posible que, en el futuro, alcance un problema de suma gravedad, debido a su incidencia en los procesos de reproducción celular, dando lugar a efectos teratogénicos y carcinogénicos.

1.2.2. Contaminantes secundarios

Anteriormente hemos indicado que una masa de aire contaminado es química y físicamente inestable, puesto que a igualdad que cualquier otro sistema, tiende a aproximarse al estado de mínima energía libre. La velocidad y mecanismos de reacción, los estados de transición y los intermedios de reacción están influenciados por factores tan diversos como concentración relativa de los reactantes, grado de fotoactivación, fuerzas dispersivas meteorológicas, influencia de la topografía local y humedad relativa.

Como ejemplos de diferentes tipos de reacción, podemos indicar las reacciones entre gotículas líquidas de nieblas ácidas con polvos de óxidos metálicos para originar aerosoles salinos, la formación de nieblas ácidas por disolución de anhídridos de ácidos en estado gaseoso en gotas de agua, y las reacciones de oxidación catalítica sobre partículas o superficie metálicas, como es el caso de la formación de nieblas de ácido sulfúrico por oxidación de nieblas de ácido sulfuroso.

La reacción ambiental más ampliamente estudiada ha sido el conjunto de reacciones de formación del "smog fotoquímico", que juega un papel importante en la contaminación de ciertas ciudades, como Los Angeles. Se inicia por una reacción en cadena en la que el NO_2 se disocia en NO y radicales O , los cuales inician a su vez reacciones en cadena sobre otros compuestos orgánicos presentes en la atmósfera, que conducen a la formación de compuestos químicos tan reactivos, y por tanto, de gran capacidad tóxica, como el ozono, formaldehído, acroleína, hidroperóxidos orgánicos, nitratos de peroxiacetilo (PAN), etc., que conducen a una serie de fenómenos atmosféricos y efectos fisiopatológicos muy molestos y dañinos.

A pesar de la diversidad de contaminantes químicos existentes en la atmósfera, del estado físico en que se encuentran en el ambiente, y de la diversidad de características meteorológicas y topográficas existentes, se admite que existen dos tipos de contaminación de la atmósfera, tomando como base para su diferenciación la tipología de sus efectos últimos.

Estos tipos de contaminación se denominan "contaminación reductora" o "contaminación tipo Londres", y "contaminación oxidante" o "contaminación tipo Los Angeles" y suponen dos condiciones extremas de contaminación definidas sobre las características específicas de los episodios y situaciones típicas ocurridas repetidas veces en estas dos ciudades, y que se sumarizan en la Tabla 2.1.3. dada a continuación.

Los rasgos predominantes de la contaminación "tipo Londres" son la presencia de óxidos de azufre, monóxido de carbono, polvos de naturaleza industrial, y hollín procedentes en su mayoría de la combustión del carbón mineral. La contaminación "tipo Los Angeles" ha suscitado atención en los últimos años, y es originada por los procesos fotoquímicos atmosféricos. Estudios recientes han mostrado que los óxidos de nitrógeno, fundamentalmente el dióxido de nitrógeno y los hidrocarburos, con los elementos principales generadores de la contaminación fotoquímica, implicando el proceso la absorción de energía radiante por el NO_2 para for-

mar NO y oxígeno atómico. La reacción entre el oxígeno atómico y molecular da origen al ozono (O_3); que es el principal agente oxidante del smog fotoquímico. Reacciones posteriores entre el ozono y los hidrocarburos olefínicos reactivos, producen otros muchos productos de naturaleza diversa, no perfectamente conocida.

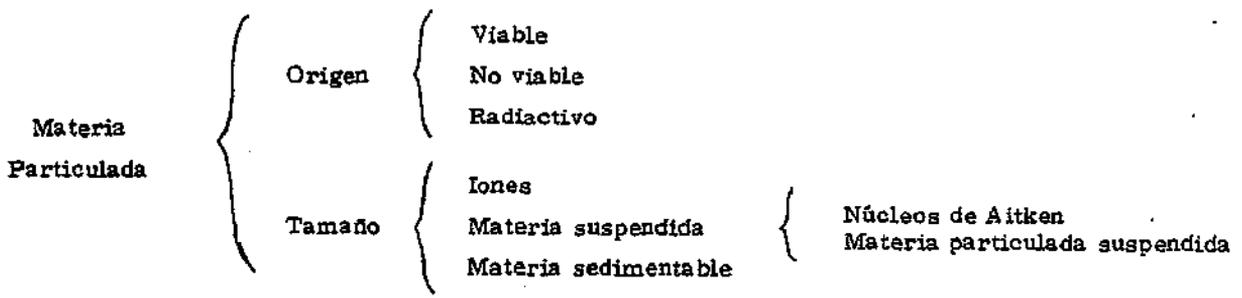
Salvo raras excepciones, estos tipos de contaminación, no se dan específicamente, siendo factible que en condiciones apropiadas, ambos tipos de contaminación puedan coexistir.

TABLA 2.1.3.

Características	Londres	Los Angeles
Compuestos más frecuentes	SO_x , materia partic. y CO.	O_3 , NO_x , CO_2 , hidrocarburos y mat. particulada.
Combustibles	Carbón mineral y petróleo.	Petróleo.
Fuentes industriales	Diversas.	Diversas.
Combustión de basura	Grande.	Pequeña.
Efectos sobre contaminantes	Reducción.	Oxidación.
Efectos sobre el hombre	Irritación mucosas pulmonares.	Irritación ocular.
Reducción de la visibilidad	Grave.	Moderada a grave.
Meses favorables	Diciembre-Enero.	Agosto-Septiembre.
Horas del día favorables	Principio mañana.	Mediodía.
Temperatura ambiente	-12 a 4'52C.	242 a 322C.
Humedad relativa	85%	75%
Velocidad del aire	0 m/h.	5 m/h.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2, 2, / 11.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	2	CAPITULO : CONTAMINANTES PARTICULADOS	01	10	80

La materia particulada puede clasificarse bien por su origen o por su tamaño. Según el primer concepto, las partículas pueden ser "viables" -de origen vegetal o animal- "no viables" -procedentes de reacciones químicas y procesos físicos sobre material inanimado- y "radiactivos", debido a la utilización por el hombre de sustancias radiactivas naturales o producidas artificialmente.



La materia particulada que contamina la atmósfera, puede hallarse comprendida dentro de un amplio margen de tamaños, que se extienden desde 6×10^{-4} a $1 \times 10^2 \mu$ de radio ($1 \mu = 10^{-3}$ mm.), si prescindimos de las dispersiones groseras, nubes, niebla y gotas de lluvia. De acuerdo con este criterio, los contaminantes particulados pueden agruparse en tres grupos principales :

a) Iones : Partículas de tamaño inferior a $10^{-1} \mu$ portadoras de cargas eléctricas. Pueden estar constituidos por moléculas gaseosas o agrupaciones moleculares con un exceso o deficiencia de electrones (iones pequeños; tamaño inferior a $10^{-3} \mu$), o por materia particulada finamente dividida que ha perdido o ganado carga eléctrica (grandes iones, comprendidos entre 10^{-3} y $10^{-1} \mu$).

b) Materia Suspendida : Puede subdividirse en dos grupos :

- Núcleos de Aitken, -o núcleos de condensación activos-, que reciben el primer apelativo por haber sido Aitken el pionero en la investigación de sus métodos de medición. Su tamaño puede estar comprendido entre $0,5 \times 10^{-2}$ y $10^{-1} \mu$. Como su propio nombre indica, estas finas partículas son las responsables de la formación de las gotitas que dan lugar a una nube. La condensación del vapor atmosférico se ve favorecida por la presencia de estas partículas sólidas extrañas, cuya superficie es humedecida por el vapor.

- Materia particulada suspendida, Son dispersiones en un medio gaseoso o en la atmósfera de partículas sólidas o líquidas, de tamaño comprendido entre 10^{-1} y $10^1 \mu$ de radio, que por poseer una velocidad de sedimentación muy baja, permanecen suspendidas gran cantidad de tiempo y son arrastradas lejos de su lugar de emisión por las corrientes de aire. Este grupo, por tanto, está integrado por los aerosoles.

Un aerosol es una dispersión de partículas sólidas o líquidas de tamaño inferior a 100μ en un medio gaseoso. Dentro de este grupo de los aerosoles, se hallan una serie de estados físicos cuya terminología inglesa es superior a la española. Son : dust, fog, mist, smoke, fume y smog, y su traducción castellana no puede ampliarse más que a cuatro vocablos: polvo, niebla, neblina o bruma y humo. Intentamos encuadrar los términos ingleses en los castellanos, basándonos en las definiciones técnicas.

Dust : Suspensión de partículas sólidas generadas por manipulación, machacamiento, molienda, impactación, agitación, pulido, detonación y decrepitación de materiales sólidos orgánicos o inorgánicos, tales como rocas, minerales, metales, carbon, madera y granos. Los polvos no flocculan, excepto bajo fuerzas electrostáticas.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./ 12.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.L. MINER	2	CAPITULO: CONTAMINANTES PARTICULADOS	01	10	80

ticas, no se difunden en el aire, pero sedimentan por la acción de la gravedad. El tamaño de las partículas de polvo suele ocupar la totalidad del margen de tamaños y su forma es irregular y con aristas.

Fog: Es un vocablo técnico indeterminado, aplicado a aerosoles líquidos visibles originados por condensación del estado gaseoso. Su margen de tamaños está comprendido entre 2 y 60 μ .

Mist: Se aplica a dispersiones de gotitas líquidas, muchas de las cuales son suficientemente grandes para ser visibles sin ayuda óptica, originadas, bien por condensación de estado gaseoso o por dispersión de un líquido, mediante salpicadura, atomización o espumación, borboteo o ebullición. Ejemplos de este tipo de aerosol lo constituyen las nieblas de aceite, originadas en operaciones de fresado y amolado, nieblas ácidas o alcalinas, producidas en procesos electroquímicos, nieblas de pinturas aplicadas por pulverización y condensación de vapor de agua para formar nubes. El margen de tamaños para estas gotitas líquidas es muy amplio, va desde 0'01 μ hasta 50 μ .

Smoke: Se define como suspensión de partículas sólidas, carbón y hollín, resultantes de un proceso de combustión incompleta suspendidas en un gas. En algunos casos, como sucede con el humo del tabaco, pueden existir partículas líquidas. Las partículas suelen ser inferiores a 1 μ .

Fume: Partículas sólidas generadas por condensación del estado gaseoso, originado por sublimación o volatilización de metales y a menudo acompañada por una reacción química, normalmente una oxidación. Las partículas sólidas que forman un fume, son extremadamente finas, usualmente esféricas e inferiores a 1 μ . En la mayoría de los casos, el metal caliente reacciona con el aire frío para formar un óxido. Los fumes flocculan y algunas veces coalescen.

Ejemplos de fume son los humos que se desprenden de metales fundidos, en operaciones de soldadura y corte de metales, y en la combustión de ciertos metales como el magnesio.

Smog: Es un término derivado de los vocablos smoke y fog, que se aplica a grandes contaminaciones atmosféricas debidas a aerosoles, originados por una combinación de causas naturales e industriales. El margen de tamaños de las partículas sólidas y líquidas que constituyen este tipo de aerosol, oscila entre 0'01 y 2 μ .

Vemos, pues, cómo dust, fog, mist y smoke, equivalen a polvo, niebla, neblina y humo, mientras que fume, debe ser asimilado al término de humo metálico, y para smog, no se encuentra un vocablo o apelación castellana apropiada.

c) **Materia Sedimentable:** Está constituida por partículas sólidas de tamaño comprendido entre 10^1 y $5 \times 10^2 \mu$, aunque las técnicas usuales de medición admiten partículas hasta de 1 mm. Es, por tanto, lo que puede denominarse "polvo grueso" que tiene una velocidad de sedimentación apreciable y tiempo de permanencia en la atmósfera, relativamente corto.

Una vez efectuada la anterior clasificación y las correspondientes definiciones, es conveniente estudiar más detalladamente las cuatro categorías existentes de la materia particulada, según el tamaño de partícula.

2.1. IONES

Hemos visto que los iones pueden clasificarse en iones pequeños y grandes iones, ocupando entre ambos el rango de tamaños comprendido entre aproximadamente 0.5×10^{-3} a $10^{-1} \mu$. Se admite que los iones con -

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./ 13.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.L. MINER	2	CAPITULO: CONTAMINANTES PARTICULADOS	01	10	80

diámetro inferior a $10^{-1}\mu$, poseen una carga media eléctrica igual a un cuanto elemental de electricidad, es decir, 4.77×10^{-10} unidades electrostáticas.

La velocidad media con la que un ión se mueve a través de un gas, por la influencia de un campo eléctrico, es proporcional a la fuerza del campo, y la movilidad del ión, definida por la razón entre la velocidad y la fuerza del campo, se mide en centímetros por segundo por voltio por centímetro (cm/s/v/cm) ó ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{v}^{-1}$). Se ha comprobado que en los iones pequeños, los que poseen carga negativa, presentan una movilidad superior a los cargados positivamente.

Mientras que los iones pequeños se forman por la acción directa de las radiaciones, solar, cósmica o radiactiva, los grandes iones se producen por combinación de los iones pequeños, con las partículas de los aerosoles o con las gotas de agua en la atmósfera. Otros procesos que generan iones, aunque en menor cuantía, son combustión, transporte de polvo en aire seco, fusión de metales y pulverización de líquidos. Debido a esta diversidad de procesos, la naturaleza química de los iones es muy diversa.

La concentración atmosférica presenta variaciones entre las diferentes estaciones climatológicas, mayor cantidad en verano que en invierno, en el caso de los iones pequeños y relación inversa para los grandes iones, y entre los diferentes periodos del día, valores máximos al principio de la mañana, y mínimos al inicio de la tarde.

La conductividad eléctrica de la atmósfera, depende de su contenido en iones pequeños, y se ha observado que en zonas contaminadas, la conductividad eléctrica del aire es menor que en zonas rurales y sobre el mar, como consecuencia de la unión de los pequeños iones a la materia particulada y consiguiente sedimentación. Se ha postulado que el aumento de la contaminación por pequeñas partículas, implica, lo cual es claramente un fenómeno mundial, un riesgo en crecimiento constante para la salud de todas las formas de vida terrestre.

2.2. NUCLEOS DE AITKEN

Los núcleos de Aitken, responsables en parte de la formación de las gotas de lluvia, se forman en la naturaleza por evaporación del agua de mar pulverizada, tormentas de polvo, actividad volcánica, fuegos forestales y radiación alfa, beta, gamma o ultravioleta. Entre las actividades industriales, son los procesos de combustión los principales formadores de núcleos de Aitken.

La composición química es muy diversa, predominando fundamentalmente compuestos orgánicos y cobre, manganeso y sodio entre los inorgánicos. La concentración atmosférica sigue un ritmo diario, mostrando un valor mínimo en las últimas horas de la noche, aumenta durante las horas del día y disminuye después de la puesta de sol. También se ha comprobado que en la atmósfera urbana, los valores máximos coinciden con las situaciones de aumento del tráfico rodado.

2.3. MATERIA PARTICULADA SUSPENDIDA

La materia particulada suspendida consiste en aquellas partículas que por su pequeño margen de tamaños, entre 0.1 y 10μ , han sido emitidas a la atmósfera, bien en la proximidad de la localización del sistema de muestreo empleado, o han sido transportadas lejos del foco emisor por las corrientes de aire.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 14,		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	2	CAPITULO : CONTAMINANTES PARTICULADOS	01	10	80

Estudios realizados sobre la distribución vertical de la materia particulada suspendida, sugieren que a alturas inferiores a 400 m. pueden existir capas de concentraciones diferentes de materia particulada, especialmente durante situaciones de inversión térmica.

Cuando la capa de inversión ha sido rota por el calentamiento solar, ocurre una distribución uniforme de la materia particulada suspendida desde el nivel del suelo hasta los 600 m. En un estudio posterior realizado midiendo la concentración indirectamente por una determinación de la turbidez atmosférica, se concluye que el factor que contribuye de forma fundamental a la dispersión de los aerosoles de las áreas urbanas, son las fuerzas ascensionales, mientras que la velocidad del viento y las desigualdades del suelo son de menor prevalencia.

Los niveles de concentración por materia particulada suspendida, presenta unos ciclos semanal y diario. La concentración media diaria sufre una disminución de aproximadamente un 15% durante el fin de semana en áreas industriales y urbanas. El ciclo diario de concentraciones presenta normalmente dos máximos coincidentes con la salida y la puesta del sol, que son debido al parecer, a la puesta en marcha de las calefacciones domésticas y hogares de combustión de las cocinas, a los ciclos de turbulencia atmosférica y a las emisiones industriales.

Aunque la composición química de la materia particulada suspendida depende de las características de la zona contaminada, puede afirmarse que existen unos componentes, tanto cualitativamente como cuantitativamente, que están presentes en la totalidad de las áreas urbanas.

Así, la fracción inorgánica está compuesta, fundamentalmente, por sulfatos, nitratos, hierro y plomo. Los constituyentes orgánicos han sido ampliamente estudiados debido a su posible potencialidad carcinogénica, como consecuencia de su alto contenido en hidrocarburos aromáticos policíclicos originados en la combustión o pirólisis de los combustibles de naturaleza carbonada, carbón y derivados del petróleo, o de cualquier tipo de sustancia orgánica.

De la fracción de materia particulada suspendida, se han aislado los componentes solubles en benceno, y en esta fracción se han determinado cualitativamente y cuantitativamente los hidrocarburos aromáticos policíclicos y, con especial atención, el contenido en benzo-pireno, por ser éste uno de los compuestos con mayor potencialidad carcinogénica.

2.4. MATERIA PARTICULADA SEDIMENTABLE

El rango de tamaño de partículas que se definen bajo la denominación del "materia particulada sedimentable", oscila entre 10 y 100 μ , y se recogen en sistemas apropiados de muestreo por sedimentación. La determinación del polvo sedimentable es una indicación de la cantidad de grandes partículas que poseen una velocidad de sedimentación apreciable y, por tanto, permanecen corto tiempo en el ambiente.

Los efectos de la materia sedimentable derivande la acción que de acuerdo con su constitución química, produzcan sobre la superficie sobre la que se depositen, pudiendo simplemente ensuciar los recubrimientos de los edificios, instalaciones industriales y el mobiliario, o causar fenómenos de corrosión en materiales de construcción de los edificios de viviendas y monumentos o de las estructuras y recubrimientos industriales.

Los componentes químicos más usuales en el polvo sedimentable, son las sustancias inorgánicas, fundamen

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2/.15.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	2	CAPITULO: CONTAMINANTES PARTICULADOS	01	10	80

almente, SiO₂, sulfatos, cloruros, nitratos, hierro, calcio, aluminio, magnesio, plomo, cinc, manganeso y cobre. Los constituyentes orgánicos son, fundamentalmente, sustancias procedentes de la combustión incompleta del carbón o de los derivados petrolíferos, es decir, alquitranes e hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Nuestra ciudad se caracteriza por los altos índices de contaminación que presenta al evaluar este parámetro. Así, las determinaciones efectuadas durante 1.968, arrojaron un valor medio de 367 mg/m²/día, y para el estudio efectuado en el período 1.970-71, 300 mg/m²/día.

En este segundo período, se estudió la composición de la materia particulada sedimentada, encontrándose que casi el 60% del polvo total, estaba formado por componentes inorgánicos insolubles en agua, encontrándose como elemento más abundante el plomo, que presentó un valor medio en el periodo de tiempo estudiado de 0'461 mg/m²/día.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, /, 16		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	3	CAPITULO : CONTAMINANTES GASEOSOS	01	10	80

Normalmente, la composición de la atmósfera seca a nivel próximo al suelo, se admite que queda descrita con las concentraciones de los componentes mayoritarios, es decir, nitrógeno (78'09%), oxígeno (20'94%), argón (0'93%) y anhídrido carbónico (0'03%). Estos cuatro componentes totalizan el 99'99% del volumen total de la atmósfera y, en principio, podríamos considerar correctamente definida la composición del aire.

No obstante, como los contaminantes atmosféricos que molestan y perjudican nuestra salud ejercen sus efectos a concentraciones del orden de la parte por millón (ppm), es necesario y conveniente expresar las concentraciones de los contaminantes gaseosos en esta unidad. Recordemos que 1 ppm se define como una unidad de volumen del contaminante implicado contenido en 10^6 unidades del mismo volumen de la mezcla aire y contaminante.

Dado que normalmente es conveniente relacionar concentraciones con efectos producidos, la expresión volumétrica de un contaminante en ppm está siendo abandonada por la expresión gravimétrica del contaminante en microgramo por metro cúbico de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). La conversión de ppm a $\mu\text{g}/\text{m}^3$ necesita considerar el volumen molar del contaminante y, por tanto, es imprescindible asumir unas condiciones normales de presión y temperatura. Se toman así, los valores de 760 mm/Hg y 25°C, como parámetros definidores de la denominación "condición normal", pudiéndose convertir la expresión de concentración de un gas a través de la siguiente fórmula:

$$\mu\text{g}/\text{m}^3 = \text{ppm} \times 41.3 \times P_m$$

Podemos concluir pues, que la anterior composición porcentual de la atmósfera seca, queda superada y no nos sirve para comparar en cuanto una determinada atmósfera se desvía de la normal. En la Tabla 2.3.1, se recoge la composición en componentes mayoritarios y minoritarios ambientales expresados en ppm.

TABLA 2.3.1.
CONCENTRACION DE GASES EXISTENTES EN EL AIRE SECO NORMAL

Gas	Concentración (ppm)
Nitrógeno	780.900
Oxígeno	209.400
Argón	9.300
Anhídrido carbónico	315
Neón	18
Helio	5,2
Metano	1,0 - 1,2
Kriptón	1
Oxido nitroso	0,5
Hidrógeno	0,5
Xenon	0,08
Dióxido de nitrógeno	0,02
Ozono	0,01 - 0,04

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2. / 17.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	3	CAPITULO : CONTAMINANTES GASEOSOS	01	10	80

El contenido atmosférico de vapor de agua, el cual oscila normalmente entre el 1 y el 3%, es de suma importancia al considerar los efectos de la contaminación ambiental. Así, la corrosión de las superficies exteriores, requiere la existencia de agua que ionice los contaminantes de naturaleza ácida, los fenómenos de disminución de la visibilidad dependen de la existencia del vapor de agua para que el anhídrido sulfúrico se convierta en partículas visibles de ácido sulfúrico.

Aunque en el capítulo anterior ya hemos mencionado los principales contaminantes atmosféricos, al describir los diferentes tipos y clasificación de la contaminación ambiental, es conveniente considerar ciertos aspectos particulares de los contaminantes más abundantes.

3.1. GASES DE NATURALEZA CARBONADA

Tres son los principales constituyentes de este grupo, el monóxido de carbono (CO), el anhídrido carbónico (CO₂) y los hidrocarburos.

3.1.1. Monóxido de carbono

Vimos también anteriormente que el monóxido de carbono alcanzaba el 55,7% de la emisión total de contaminantes estimados para 1970 en Estados Unidos, siendo las fuentes de emisión fundamentales, el escape de los vehículos automóviles, los hogares de combustión doméstica y los procesos de combustión industrial.

Los estudios realizados demuestran que la concentración de CO en diferentes ciudades oscila entre 5 y 60 ppm, dependiendo del tipo de zona urbana muestreada. Así, en Los Angeles, se encontraron valores medios de 58, 27,5 y 11,8 ppm de CO, en calles de tráfico pesado, medio y ligero, respectivamente.

En un estudio de la contaminación ambiental de Sevilla realizado en el verano de 1,969 y durante el período 1.970-71, se encontraron valores puntuales comprendidos entre 5 y 70 ppm, en las calles del centro de la ciudad, dependiendo las oscilaciones de las medidas de la fluidez del tráfico rodado en el momento de la medición.

3.1.2. Anhídrido carbónico

Es uno de los componentes normales de la atmósfera (315 ppm) y su concentración varía con la densidad de vegetación y con la intensidad del proceso fotosintético, desde 500 a 300 ppm, aproximadamente, alcanzándose los valores máximos al final de la noche, aproximadamente a las 7,00 horas, y los valores mínimos a la caída de la tarde, aproximadamente a las 17,00 horas.

Investigaciones exactas demuestran que la concentración de CO₂ de la atmósfera de la tierra en la década de los 60, subía anualmente en 0,7 ppm, atribuyéndose este incremento al uso de combustibles del petróleo. Existen teorías encontradas sobre el impacto a largo plazo que este aumento de la concentración media de anhídrido carbónico puede producir en las condiciones climáticas de nuestro planeta.

3.1.3. Hidrocarburos

Con este nombre genérico se denomina en contaminación, a una amplia gama de compuestos orgánicos volátiles, desde típicos hidrocarburos a alcoholes, aldehidos, cetonas, hidrocarburos halogenados, ésteres, éte

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2./, 18		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	3	CAPITULO : CONTAMINANTES GASEOSOS	01	10	80

res, etc., que son de gran interés por su participación en los fenómenos de formación del "smog fotoquímico".

El estudio analítico por Espectrometría de Masas del condensado de una muestra atmosférica a la temperatura del oxígeno líquido, demostró la existencia de hasta 80 componentes. La complejidad en la naturaleza del condensado, se infiere de los numerosos procesos naturales e industriales y operaciones industriales en los que pueden emitirse vapores orgánicos a la atmósfera. Así, volatilización de disolventes industriales y combustibles líquidos, emisión de combustibles no quemados de los motores de combustión interna, productos formados en estos procesos incompletos de combustión y síntesis fotoquímica, a partir de los contaminantes primarios de productos tales como peróxidos y radicales libre orgánicos, perácidos, hidroxiperácidos y compuestos nitrogenados, como los peroxiacitratos.

La incidencia más desfavorable de esta gama de compuestos orgánicos, tiene lugar en la contaminación de tipo oxidante, estimándose que en núcleos urbanos tipo "Los Angeles" el contenido de hidrocarburos atmosféricos, puede alcanzar hasta un 50% del contenido de metano en el ambiente.

3.2. COMPUESTOS DE AZUFRE

Los principales contaminantes de naturaleza sulfurada son los óxidos de azufre, el ácido sulfhídrico (SH_2) y los mercaptanos (RSH).

3.2.1. Oxidos de azufre

De los dos óxidos de azufre, anhídrido sulfuroso (SO_2) y anhídrido sulfúrico (SO_3), sólo el primero de ellos se encuentra en forma gaseosa, ya que el SO_3 absorbe vapor de agua para dar gotículas de ácido sulfúrico.

El anhídrido sulfuroso es el más común de los contaminantes gaseosos encontrado en el ambiente urbano, siendo su origen la oxidación de los compuestos de azufre existentes en los combustibles sólidos y líquidos y ciertos procesos industriales.

El gran interés dedicado a su medición y control, se debe a que aún en pequeñas concentraciones, posee efectos indeseables o perjudiciales sobre la salud del hombre y de los animales, sobre los vegetales, corroe los materiales de construcción y destruye los tejidos y el cuero. Recientemente se discute sobre un posible efecto carcinogénico del SO_2 , probablemente potenciado por la presencia en el polvo ambiental de ciertos elementos metálicos.

Todo ello, ha llevado a la realización de numerosos estudios sobre el impacto económico de la contaminación por el anhídrido sulfuroso.

La concentración media de SO_2 encontrada en el ambiente de numerosas ciudades, oscila entre 2,64 y 1.057 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dependiendo este margen de concentraciones, del tipo de ciudad y de la época del año, encontrándose los valores más altos en épocas invernales con baja precipitación de lluvia.

En el estudio de contaminación urbana de Sevilla mencionado anteriormente, las concentraciones medias mensuales durante el período 1.970-1.971, oscilaron entre 78,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Junio del año 1.970 y 7,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Diciembre de 1.970. Es necesario hacer notar que en el mencionado mes de Diciembre de 1.970, las preci

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 19.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	3	CAPITULO : CONTAMINANTES GASEOSOS	01	10	80

pitaciones fueron en Sevilla muy numerosas, con lo que efectuaron una eficiente limpieza del aire contaminado.

El muestreo continuo simultáneo de SO₂ y de aerosoles ácidos, indica que la concentración de SO₂ es aproximadamente 100 veces superior a la de SO₃ y que la mayoría de los sulfatos particulados, se encuentran en forma de sales. Ello ha confirmado que la transformación del SO₂ en SO₃ en la atmósfera, es lenta, dependiendo fundamentalmente de las condiciones ambientales.

3.2.2. Acido sulfhídrico y mercaptanos

Ambos son contaminantes ocasionales y minoritarios de la atmósfera urbana, estribando sus efectos en olores desagradables y en su capacidad para oscurecer pinturas y objetos metálicos, como consecuencia de la formación de sulfuros y mercaptidas metálicas.

El origen de estos contaminantes, se debe en el caso del SH₂, a escapes accidentales en ciertos procesos industriales y a la degradación anaeróbica de la materia orgánica y a la emisión de gases residuales en la industria de la pulpa de celulosa por el método kraft, en el caso de los mercaptanos.

Salvo situaciones de emisiones accidentales, la concentración de SH₂ encontrada en el ambiente urbano, es siempre inferior a 0,020 ppm (28 µg/m³).

3.3. COMPUESTOS DE NITROGENO

Los compuestos gaseosos más importantes en contaminación atmosférica, son los óxidos de nitrógeno, el amoníaco y los peroxiacilnitratos o nitratos de peroxiacilo.

3.3.1. Oxidos de nitrógeno

Los compuestos más importantes y comunes son el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el óxido nítrico (NO). El dióxido de nitrógeno se forma durante los procesos de combustión por oxidación de parte del nitrógeno del aire que alimenta el proceso, y en procesos industriales, tales como la obtención de ácido nítrico, nitración de la celulosa y obtención de celuloide y películas de fotografía. La fuente fundamental de formación del NO es la oxidación parcial de nitrógeno atmosférico en el interior de los motores de combustión interna.

Los niveles de contaminación urbana para estos contaminantes, oscilan entre 19 y 570 µg/m³ para el NO₂ y entre 12 y 740 µg/m³ para el NO.

Normalmente, las concentraciones más altas en óxidos de nitrógeno se alcanzan en los meses de invierno, explicándose los niveles inferiores del verano, como una suma de una mayor ventilación atmosférica, por velocidad y temperatura más altas y de una menor utilización de combustibles líquidos en los hogares de combustión domésticos.

Es necesario hacer notar que en las ciudades de contaminación tipo oxidante, los episodios más altos de "smog fotoquímico" se dan en los meses de verano, cuando precisamente los niveles de óxidos de nitrógeno son mínimos.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 20		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	3	CAPITULO : CONTAMINANTES GASEOSOS	01	10	80

3.3.2. Amoniacos

El amoníaco es un contaminante que aparece en raras ocasiones y siempre con motivo de fugas en instalaciones industriales. Su importancia estriba en que puede interferir en la determinación analítica de la denominada "acidez total" expresada en SO_2 , ya que en la solución absorbente de H_2O_2 se absorbe también el NH_3 neutralizando el ácido sulfúrico formado y obteniendo, por tanto, resultados erróneos por defecto.

3.3.3. Peroxiacilnitratos

Aunque se intuía que las reacciones fotoquímicas ambientales podían conducir a nitratos orgánicos, no fue hasta 1.960 cuando se pudo identificar la existencia en el aire de un tipo de sustancias que demostraron ser nitratos de peroxiacilo, fundamentalmente nitrato de peroxiacetilo, conocido abreviadamente por PAN (Peroxyacetyl nitrate).

El interés hacia este tipo de compuesto ha aumentado notablemente al descubrirse que aún en pequeñas concentraciones, son unos poderosos agentes tóxicos para la vegetación. Según la bibliografía, las concentraciones encontradas no sobrepasan el valor de 35 ppb.

3.4. OZONO Y OXIDANTES

La presencia en una atmósfera urbana de ozono y de ciertas sustancias orgánicas oxidantes, tales como peróxidos, en concentraciones superiores a las normales, es la señal característica de que en dicho ambiente tiene lugar una contaminación tipo "Los Ángeles". Los datos sobre estos contaminantes se expresan en concentración de ozono y de oxidantes orgánicos, o bien ambos valorados conjuntamente como "oxidantes totales".

Los efectos del ozono derivan de su fuerte capacidad oxidante, lo que conduce a desintegración del caucho, corrosión de metales, daños a la vegetación, irritación de mucosas oculares y respiratorias, e irritación de la piel.

Los niveles normales de oxidantes totales en ciudades de contaminación tipo reductora, son del orden de 0'01 ppm, mientras que en Los Angeles, se han llegado a detectar valores de hasta 0'8-1 ppm, siendo perfectamente distinguible a partir de 0'15 ppm a través de picazón en las mucosas del ojo y tracto respiratorio superior.

Se ha demostrado que la concentración de ozono y oxidantes sufren un ciclo repetitivo cada día, coincidiendo las concentraciones más altas con la hora de máxima actividad solar, es decir, al mediodía. También, que al aumentar la altitud del área de muestreo se incrementan los valores de contaminación para estos contaminantes.

3.5. FLUORUROS Y ACIDO FLUORHIDRICO

El ácido fluorhídrico es el compuesto halogenado más importante como contaminante de la atmósfera. El origen de la aparición del FH y de los fluoruros en la atmósfera, es consecuencia fundamental de emisiones de ciertas actividades industriales, siendo las principales la metalurgia del aluminio y la fabricación de fertilizantes fosfatados y de cemento y, en menor cuantía, la combustión de carbón mineral, donde estén presentes impurezas de fluoruros.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2, 2, / 21		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. M I N E R	3	CAPITULO : CONTAMINANTES GASEOSOS	01	10	80

El rango de concentración normal de FH en el ambiente urbano, oscila entre 0'8 y 18 ppb, como valores de concentración promedio diaria, mientras que en los alrededores de plantas de fertilizantes, pueden encontrarse fluoruros hasta valores de 4'3 ppm.

No obstante las pequeñas concentraciones encontradas, el interés por el FH y los fluoruros, se deriva de sus efectos perniciosos sobre la vegetación y debido a ser un tóxico acumulativo, por lo que puede originar problemas en ganado que pascen en la proximidad de las industrias contaminantes.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2, / ,22		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E. O. I. M I N E R	4	CAPITULO : REACCIONES DE LOS CONTAMINANTES EN LA ATMOSFERA. SMOG FOTOQUIMICO.	01	10	80

En un capítulo anterior, cuando intentábamos definir los diferentes tipos de contaminación atmosférica y efectuar su clasificación, decíamos que desde el punto de vista del origen del contaminante, estos se podían clasificar en contaminantes primarios y secundarios, siendo unos los originalmente emitidos al ambiente por los distintos focos emisores y los segundos, aquellos que se formaban por reacciones químicas sufridas por los primarios, como consecuencia de su tendencia a llegar a estados inferiores de energía potencial.

La formación de contaminantes secundarios, puede conducir, bien a productos menos dañinos o peligrosos para la actividad humana o; por el contrario, a productos inócuos. Por otra parte, los procesos químicos que ocurren en la atmósfera, se producen consumiendo energía procedente del sol y, por tanto, pueden incidir de forma desventajosa, tanto en la cantidad, como en la calidad de la energía solar que llega a la superficie de la corteza terrestre.

Por ello, se ha realizado un gran esfuerzo de investigación, tanto en el sentido de identificar la naturaleza de los contaminantes secundarios, como en el conocimiento de los mecanismos de reacción y requerimientos energéticos necesarios para su formación.

A pesar de las numerosas investigaciones realizadas y del amplio bagaje de conocimientos actualmente disponibles, queda aún un amplio campo para la investigación. Piénsese por ejemplo, que la evaporación de la gasolina, las emisiones de los escapes de los medios de transporte y las emisiones de los hornos de combustión e incineración, lanzan al aire miles de toneladas formadas por miles de diferentes sustancias orgánicas e inorgánicas, que se mezclan con los componentes naturales del aire y, dependiendo de su estabilidad química, reaccionarán y se transformarán rápidamente, o exhibirán un tiempo de permanencia considerable.

4.1. ASIMILACION ATMOSFERICA DE LOS CONTAMINANTES

No obstante la constante emisión de sustancias extrañas a la composición de la atmósfera, ésta no cambia cualitativamente. Sólo se admite que la emisión a lo largo de numerosos años de billones de toneladas de anhídrido carbónico, procedente de la combustión del carbón y de combustibles fósiles, produce un aumento anual de 1 ppm en la concentración global de la atmósfera, lo cual ha llevado a que se hayan postulado diversas hipótesis sobre sus posibles efectos sobre las condiciones de vida de nuestro planeta.

Los fenómenos que facilitan la eliminación o separación de los contaminantes atmosféricos, se denominan "procesos de asimilación atmosférica", y en ellos están implicados también procesos químicos de reacción entre diferentes contaminantes o entre componentes naturales de la atmósfera y los contaminantes.

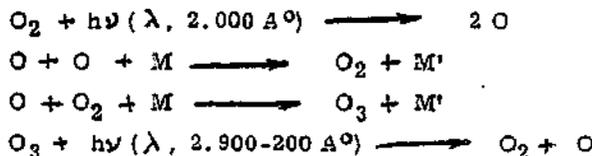
Las turbulencias atmosféricas y los fenómenos de difusión de los contaminantes, permiten que tras su liberación a nivel del suelo, puedan alcanzar niveles atmosféricos superiores, donde se exponen al impacto de fotones de alta energía que pueden romper, degradar y reordenar hasta las moléculas más estables.

Las reacciones antes enunciadas se inician por la acción del oxígeno en estado atómico o del ozono. Se sabe que a alturas superiores a los 80 km., el oxígeno se encuentra casi exclusivamente en estado monoatómico, a niveles inferiores, la concentración de oxígeno atómico es mayor y debido a su gran reactividad, se combina parcialmente con otras especies idénticas para dar oxígeno molecular o con éste, generando ozono. La región de la atmósfera donde se encuentran las mayores concentraciones de ozono es la comprendida entre los 16 y 32 km. de altura y se admite que, a través de los constantes fenómenos de difusión y mezcla de ga-

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2./23		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	4	CAPITULO : REACCIONES DE LOS CONTAMINANTES EN LA ATMOSFERA. SMOG FOTOQUIMICO.	01	10	80

ses en el ambiente, una parte del ozono formado, desciende a las capas inferiores de la atmósfera y alcanzan dose el valor normal de 0'03 ppm.

Las reacciones que sufre el oxígeno en las capas superiores de la atmósfera, son las siguientes:



La molécula de O_2 absorbe un cuanto de energía correspondiente a $\lambda = 2.000 \text{ A}^\circ$, zona del ultravioleta del espectro electromagnético, de un valor aproximado de 140 kcal/mol, y se disocia en especies monoatómicas, las cuales pueden de nuevo recombinarse cediendo energía a una molécula de contaminante (M) que se transforma en una nueva sustancia (M'), o puede unirse a una molécula de O_2 para dar ozono y liberar energía que se utiliza en una nueva reacción de transformación de un contaminante. Finalmente, la molécula de ozono formada, absorbe la energía suministrada por la radiación ultravioleta en el rango de 2.900-2.000 A° y se descompone en O_2 y oxígeno monoatómico, que de nuevo empieza el ciclo. Es decir, el papel del oxígeno ha consistido en captar una energía y cederla en los procesos de reacciones químicas de transformación de los contaminantes.

La existencia de esta capa atmosférica rica en ozono, denominada ozonósfera, efectúa una acción filtrante sobre la radiación solar, impidiendo que la radiación más energética, es decir, la longitud de onda inferior a 2.900 A° , alcance la superficie de la tierra, ocurriendo, por tanto, reacciones químicas más suaves. Así, los contaminantes inorgánicos serán convertidos en sales estables, principalmente sulfatos, nitratos y cloruros, que como consecuencia de los fenómenos de floculación y sedimentación, se incorporarán al suelo. Los contaminantes orgánicos son oxidados hasta CO_2 y agua, y el nitrógeno orgánico en sales de amonio y nitratos.

Como decíamos anteriormente, la composición de la tierra y de su atmósfera no cambia cualitativamente, pero sí ocurren cambios cuantitativos importantes a través de los años como consecuencia de la emisión de billones de toneladas de CO_2 procedente de los procesos de combustión.

4.2. TIPOS DE REACCIONES ATMOSFERICAS

Tanto para nuestro conocimiento de los fenómenos atmosféricos, como para el control de la contaminación atmosférica, es de interés saber qué tipos de reacciones se dan más frecuentemente en el ambiente, así como cuáles son sus características fundamentales. Así, conoceremos en qué circunstancias y tiempos tienen lugar estas transformaciones, la naturaleza de los intermedios de reacciones, sus efectos sobre las estructuras y formas de vida, y los productos finales estables en los que terminan las reacciones químicas en la atmósfera.

Puesto que las velocidades de reacción dependen de las concentraciones relativas de los reactantes, es claro que los constituyentes mayoritarios reactivos del ambiente, principalmente O_2 , CO_2 y H_2O , fundamentalmente el O_2 , intervendrán en numerosas reacciones con los contaminantes y que dichas reacciones presentarán velocidades de reacción muy altas. Es decir, estas reacciones progresan muy rápidamente durante el tiempo que los contaminantes están siendo estudiados en una área ambiental determinada.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2. / 24		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	4	CAPITULO : REACCIONES DE LOS CONTAMINANTES EN LA ATMOSFERA. SMOG FOTOQUIMICO.	01	10	80

Con el fin de sistematizar el estudio de las reacciones en la atmósfera, es conveniente estudiar primero los diferentes tipos de reacciones, para después entrar en las reacciones que sufren los contaminantes primarios fundamentales y que bajo ciertas circunstancias, conducen a la formación del denominado "smog fotoquímico".

4.2.1. Reacciones Fotoquímicas Primarias

Son aquellas que tienen lugar por la acción de la radiación solar sobre los contaminantes primarios.

El ejemplo más importante es la fotodisociación del dióxido de nitrógeno (NO_2), el cual, gracias a la energía absorbida de casi el rango total de radiación ultravioleta-visible, se disocia según la reacción:

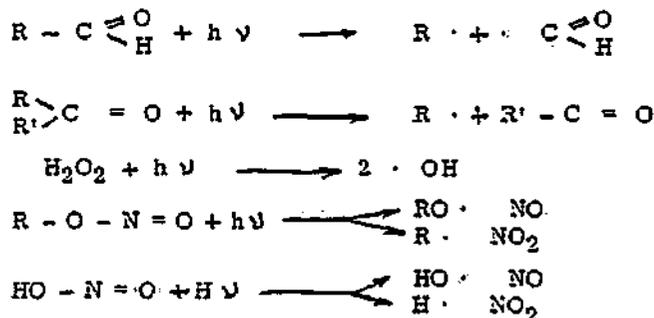


La energía requerida para la disociación del enlace entre el nitrógeno y el oxígeno es de 72 kcal/mol, que corresponde a una longitud de onda de 4.000 \AA . Se admite que a valores inferiores a 3.700 \AA , a menor longitud de onda mayor energía, un 90% de las moléculas de NO_2 sufren la disociación, y que bajo las condiciones ambientales de luz solar la reacción exhibe un "tiempo de vida media de 2 minutos".

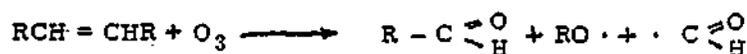
De menor importancia es la fotodisociación que sufren las moléculas orgánicas, tales como aldehídos, olefinas, hidrocarburos aromáticos, etc., otras sustancias inorgánicas como halógenos y óxidos metálicos, o incluso las que pueden tener lugar entre especies orgánicas e inorgánicas, como la formación de sustancias fuertemente irritantes para las mucosas oculares por reacción entre estireno y cloro, por acción de la luz ultravioleta.

4.2.2. Reacciones con Formación de Radicales Libres (*)

Un papel importante juegan en los fenómenos de contaminación atmosférica las reacciones que producen radicales libres, ya que debido a las pequeñísimas concentraciones en que se forman y a pesar de su gran reactividad química, pueden permanecer durante horas en la atmósfera. Entre las especies químicas que por acción de la radiación ultravioleta pueden originar radicales libres, se hallan los aldehídos, cetonas, agua oxigenada, nitratos de alquilo, arilo y peroxiacilo, nitritos de alquilo y los ácidos nitroso y nítrico.



También, pueden formarse radicales libres por reacción entre contaminantes. El caso más típico es el que tiene lugar entre las olefinas y el ozono.



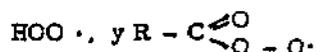
(*) Radicales libres : Entidades químicas con gran reactividad.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2.1 / 25		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	4	CAPITULO : REACCIONES DE LOS CONTAMINANTES EN LA ATMOSFERA. SMOG FOTOQUIMICO.	01	10	80

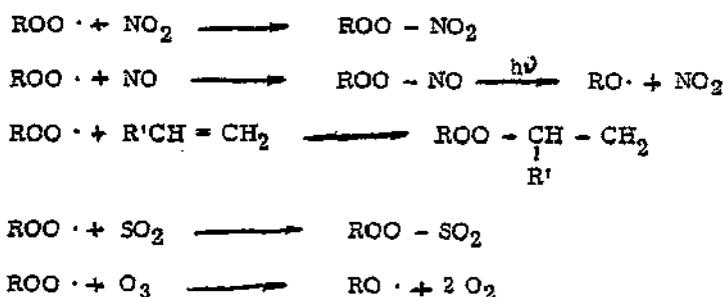
Los radicales libres se hallan diluidos en una masa de oxígeno, con el cual reaccionan, dando lugar a los radicales peróxidos.



De forma similar, los radicales hidrógeno y acilo, dan los correspondientes peroxiradicales.



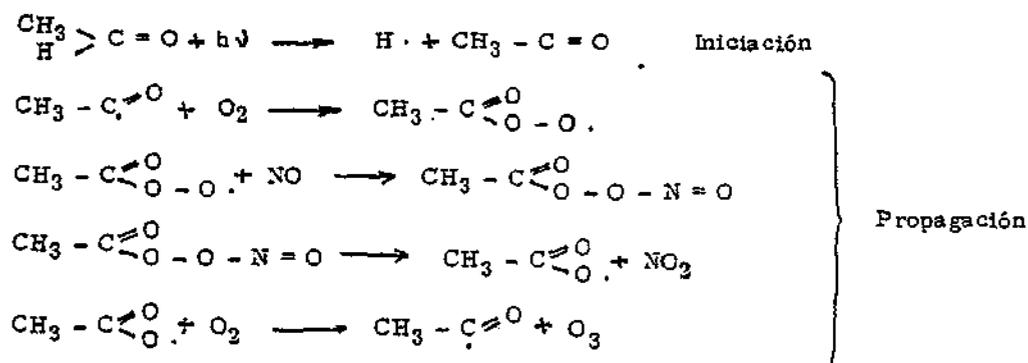
Los radicales peróxidos reaccionarán fácilmente con otros contaminantes, tales como NO_2 , NO , olefinas, SO_2 , y O_3 para dar nuevas especies químicas.

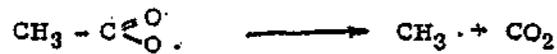


4.2.3. Reacciones en Cadena

Los radicales libres formados por el ataque fotoquímico sobre los contaminantes secundarios, o los radicales libres originados por las reacciones de los radicales libres sobre moléculas de contaminantes primarios, pueden sufrir nuevas reacciones que den lugar a nuevos radicales libres, los cuales, a su vez, se incorporan a nuevas reacciones. A menudo, estos pasos no progresan indefinidamente hacia la formación de especies nuevas, sino que dan lugar a radicales libres idénticos a los formados primariamente, con lo que se cierra un ciclo de reacciones. Se da así lo que se denominan reacciones en cadena, con sus tres características fases de iniciación, propagación y finalización. Como ejemplo típico, podemos poner la transferencia de un átomo de oxígeno a una molécula de NO para dar NO_2 , a través de la formación y ruptura de una molécula de nitrato de peroxiacetilo.

El proceso se inicia por la fotodescomposición de una molécula de acetaldehído y termina con la generación de nitrato de peroxiacetilo, altamente irritante.





Finalización

Este es el proceso fotoquímico característico del denominado "smog fotoquímico", que conduce a la formación de altas concentraciones de NO_2 , O_3 y nitrato de peroxiacetilo.

4.3. SMOG FOTOQUIMICO

El "smog fotoquímico" es una situación típica de contaminación oxidante, que es característica de la ciudad de Los Angeles, donde ha sido estudiada, tanto desde el punto de vista de su origen, circunstancias concurrentes, mecanismos de reacción, y efectos sobre la vida de los productos intermedios y finales.

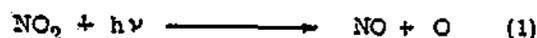
Según los datos estadísticos, la emisión de contaminantes en Los Angeles se caracteriza por los gases y materia particulada procedente de los escapes de los motores de combustión interna, que alcanzan un 68% de la totalidad de contaminantes emitidos y que están constituidos, fundamentalmente, por CO , NO_x y gases de naturaleza orgánica, fundamentalmente, hidrocarburos olefínicos.

La populosa ciudad, con un gran número de vehículos, está enclavada en una zona del litoral del Océano Pacífico, con un elevado número de horas de sol anuales y una mayoría de situaciones de alta presión a lo largo del año, lo que favorece, en su conjunto, que a una altura de 500 a 1000 metros, se de una capa de inversión térmica que impide una buena ventilación ascendente del aire contaminado y, además, la existencia próxima de una cadena de colinas que circundan a la ciudad y unas débiles corrientes de aire, tampoco favorecen el arrastre de la masa de aire contaminado.

En conjunto, la gran cantidad de contaminantes emitidos, su largo periodo de permanencia en las capas inferiores de la atmósfera, y la gran cantidad de energía solar que incide sobre la masa de aire contaminado, contribuyen a que en la atmósfera de Los Angeles, se produzcan un gran número de reacciones fotoquímicas que dan lugar a la formación de elevadas cantidades de NO_2 , O_3 , nitrato de peroxiacetilo, y radicales libres orgánicos, que deterioran los alimentos, secan y ennegrecen las pinturas, desintegran el caucho, producen productos resinosos en los derivados del petróleo, alteran la función clorofílica, e irritan las mucosas oculares y respiratorias de los animales y el hombre.

De todo lo dicho anteriormente, podemos resumir que el "smog fotoquímico" se produce por reacción entre el óxido nítrico, los hidrocarburos reactivos, principalmente, las olefinas y la luz solar.

El proceso fotoquímico se inicia con la disociación del dióxido de nitrógeno:



A continuación, el oxígeno monoatómico reacciona rápidamente con la molécula de oxígeno y con una tercera molécula (M), en la mayoría de las ocasiones las muy abundantes de N_2 u O_2 , que absorbe la energía de la reacción:



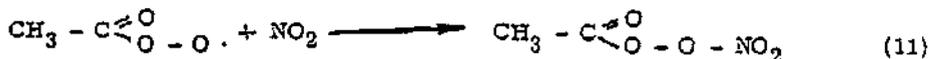
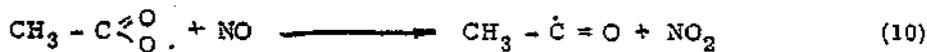
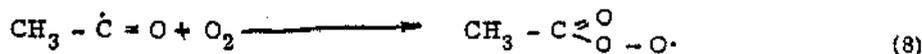
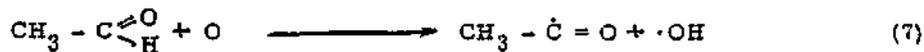
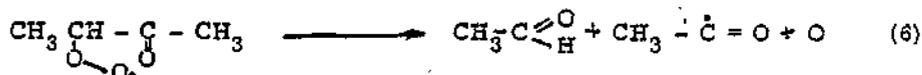
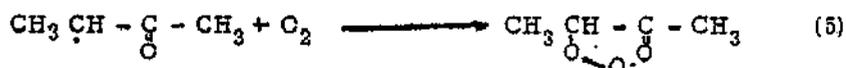
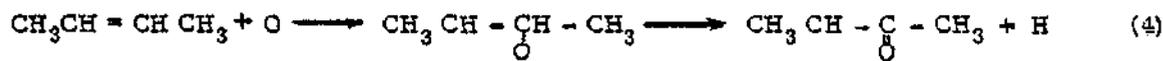
Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2/.27..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	4	CAPITULO: REACCIONES DE LOS CONTAMINANTES EN LA ATMOSFERA. SMOG FOTOQUIMICO.	01	10	80

Esta reacción marcha también rápidamente, no obstante el requerimiento de que tenga lugar una triple colisión. Posteriormente, una tercera reacción cierra el ciclo :



De acuerdo con las leyes termodinámicas implicadas, se sabe que 0'1 ppm de NO₂ producen 0'027 ppm de O₃. Puesto que la mayoría del nitrógeno lanzado al ambiente lo es en forma de NO y la concentración normal de NO₂ es inferior a 0'1 ppm, los niveles de O₃ no deberían superar el valor de 0'027 ppm. Sin embargo, el ozono alcanza valores superiores, llegando a veces a las 0'5 ppm en concentraciones promedio pico de 1 hora. Es necesario, por tanto, encontrar otra reacción que afecte al ciclo normal óxidos de nitrógeno-ozono, y que explique los superiores niveles de ozono encontrados. Dicho de otra forma, necesitamos encontrar un proceso que explique la oxidación del NO a NO₂, sin consumir el ozono.

La respuesta se obtiene al considerar la acción del oxígeno atmosférico formado en la ecuación (1) sobre las olefinas. Aunque está generalmente admitido que son los hidrocarburos olefínicos los que permiten en su degradación oxidativa la transformación del NO en NO₂ y el aumento en la concentración de O₃, no existe un acuerdo sobre los mecanismos que tienen lugar. Se han propuesto varios, y nosotros sólo vamos a recoger aquí uno de los propuestos, convenientemente simplificado y ejemplificado para el buteno-2.



Los pasos (4, 5, 6 y 7) forman la fase de iniciación del proceso en cadena, las ecuaciones (8, 9 y 10) constituyen la fase de propagación, y finalmente (11) es uno de los diversos pasos que finalizan la reacción en cadena.

El NO₂ formado, a través de las ecuaciones (1) y (2), conduce a un aumento notable de la concentración de ozono.

El conjunto de variables geográficas, climatológicas, y de emisión de contaminantes favorables a la formación de "smog fotoquímico" no se dan exclusivamente en Los Angeles. En cualquier área urbana en que coin

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	HOJA 2.2/28.		
	2		F E C H A		
E.O.I. MINER	4	CAPITULO : REACCIONES DE LOS CONTAMINANTES EN LA ATMOSFERA. SMOG FOTOQUIMICO.	01	10	80

cidas características similares a las enunciadas, existe la posibilidad de que en las estaciones de alta radiación solar, se produzca este fenómeno en alguna extensión.

De hecho no existen situaciones de contaminación típicas idénticas a las de Londres y Los Angeles, sino situaciones intermedias en las que, dependiendo de la naturaleza de las emisiones o de los parámetros meteorológicos, predominan un tipo u otro de contaminación.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2-2./ . 29..		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	5	CAPITULO : LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80

5.1. INTRODUCCION

En el transcurso de los tiempos, la civilización ha hecho uso de la combustión como medio de disponer de calor para las más diversas aplicaciones. Más recientemente, la combustión ha sido utilizada de forma intensiva para la generación de potencia en las denominadas centrales térmicas.

Los procesos de combustión van siempre acompañados por la emisión a la atmósfera de productos residuales (gases, humos, partículas, etc.) que constituyen una importante fuente de contaminación del aire.

Si pasamos a analizar las fuentes contaminantes que intervienen en la degradación de la calidad del aire, es posible afirmar que a un sólo fenómeno, la combustión, corresponde parte importante de esta alteración. - Existen una serie de datos que avalan lo anterior.

En España, y según datos de 1.972, la distribución entre las distintas fuentes de contaminación, era la siguiente :

Fuente	Emisiones (%)
Combustión fija	
. Térmicas	14,8
. Otras instalaciones	23,6
Transporte	33,4
Industria	28,2

El desglose por tipo de contaminante de estas emisiones, es el siguiente :

FUENTE	Emisiones (Tm)			
	SO ₂	Partículas	NO _x	CO
Combustión fija.				
. Térmicas	487.810	463.401	102.562	--
. Otras instalaciones	450.220	1.240.997	1.723	9.158
Transporte	--	55.100	161.000	2.304.500
Industria	680.739	760.212	39.709	564.112
TOTALES	1.618.769	2.519.710	304.994	2.777.770

La distribución porcentual es :

FUENTE	Emisiones (%)			
	SO ₂	Partículas	NO _x	CO
Combustión fija				
. Térmica	30	18	34	--
. Otras instalaciones	28	50	--	--
Transporte	--	2	53	80
Industria	42	30	13	20

Lo que nos indica que las instalaciones de combustión fija existentes en nuestro país, aportaban a las cifras globales de emisión de contaminantes, un 58% del SO₂, el 68% de las partículas y un 34% de las NO_x.

Comparativamente, la participación de las distintas fuentes de emisión en Francia, era la siguiente :

<u>Fuente</u>	<u>Emisiones (%)</u>
Centrales térmicas	15
Calefacción doméstica	25
Residuos sólidos	3
Transporte	22
Industria	35

Para Estados Unidos, los porcentajes de emisión eran los siguientes :

FUENTE	Emisión (%)					
	%	SO ₂	CO	HC	NO _x	Partículas
Combustión fija	15,7	55	4,1	2	22,6	16,3
Transporte	51,4	0,7	77,2	13,6	7,7	0,8
Residuos sólidos	4,2	1,7	66,3	16,8	3,4	11,8
Industria	14,1	18,9	30,3	13,9	0,5	36,4
Varios	14,6	0,5	44,4	22,4	4,9	27,8

Otros datos correspondientes a 1.974 en Estados Unidos, ponen de manifiesto que la contribución de las fuentes fijas a la contaminación de la atmósfera, era de casi el 80% de las emisiones totales de SO₂ y de más de un 25% de las emisiones de partículas. Los automóviles y otros medios de transporte eran responsables de una cantidad superior al 75% de las emisiones de CO y del 50% de los NO_x.

Éstas cifras, de por sí reveladoras de la importante contribución de la combustión a la polución atmosférica, ponen de manifiesto otra faceta, no menos importante, de la cuestión. Habida cuenta que la principal fuente de energía en el momento actual está constituida esencialmente por la combustión de combustibles fósiles, determinantes de la magnitud de la contaminación del aire, difícilmente se podrá abordar un programa de planificación energética sin tener en cuenta las incidencias que se pueden derivar para el tema de la contaminación.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./..31..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.C.I. MINER	5	CAPITULO: LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80

5.2. TEORIA DE LA COMBUSTION

5.2.1. Combustión completa

La combustión es una reacción compleja entre el oxígeno del aire y los combustibles, consistente en un proceso de oxidación a través de mecanismos de reacciones rápidas en cadena.

Los productos de la misma, cuando es perfecta, no pueden considerarse nocivos, pues son asimilables a los que proceden de los organismos vivos. En efecto, cuando se quema un combustible cualquiera se obtiene, al término de la combustión, anhídrido carbónico y agua, que resultan de la oxidación completa del carbono y del hidrógeno del combustible por el oxígeno del aire. Como todos los combustibles contiene también, pero en menor cantidad, azufre. La combustión completa debe dar lugar igualmente a la formación de anhídrido sulfúrico (SO_2) y también a óxidos de nitrógeno (NO_x) por reacción, a altas temperaturas, del nitrógeno y oxígeno del aire.

• Aire mínimo para la combustión.

Denominamos aire mínimo o teórico para la combustión, a la cantidad estequiométrica de éste, necesaria para una combustión completa.

Para los combustibles sólidos y líquidos, el aire mínimo de combustión en condiciones normales, puede calcularse mediante la expresión :

$$\text{Am. comb.} = \frac{2,67 P_C + 8 P_{H_2} + P_S - P_{O_2}}{0,3} \text{ N m}^3$$

donde, P_C , P_{H_2} , P_S y P_{O_2} , es el peso de estos elementos por kg. de combustible.

Para los combustibles gaseosos, la expresión será :

$$\text{Am. comb.} = \frac{\frac{V_{H_2} + V_{CO}}{2} + 2V_{CH_4} + 3V_{C_2H_4} + 2,5V_{C_2H_2} + (a + \frac{b}{4}) V_{C_aH_b} - V_{O_2}}{0,21}$$

donde, V , es el tanto por ciento en volumen de los distintos componentes del gas.

• Exceso de aire.

Para conseguir una combustión completa, es preciso introducir en el hogar una cantidad de aire superior al aire mínimo de combustión.

Se denomina coeficiente de exceso de aire, al cociente entre el aire introducido y el aire mínimo de combustión.

Para los distintos tipos de combustibles, los coeficientes de exceso de aire pueden valer :

Combustibles sólidos :	1,5 - 2
Combustibles líquidos :	1,1 - 2
Combustibles gaseosos :	1 - 1,1

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 32		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	5	CAPITULO: LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80

• Volumen total de humos.

El volumen total de humos vendrá dado por la suma de las cantidades parciales de los diferentes productos de combustión.

Para los combustibles sólidos y líquidos, el volumen total de humos a 0°C y 760 mm. por kilogramo de combustible, se puede calcular mediante la expresión:

$$V_{\text{humos}} = 22,4 \left[\left(\frac{P_C}{12} + \frac{P_{H_2}}{4} + \frac{P_S}{32} - \frac{P_{O_2}}{32} \right) \frac{n}{0,21} + \frac{P_{H_2}}{4} + \frac{P_{O_2}}{32} \right] \text{ Nm}^3$$

Para los combustibles gaseosos, la expresión a utilizar será:

$$V_{\text{humos}} = \frac{V_{H_2} + V_{CO}}{2} \left(\frac{n}{0,21} + 1 \right) + V_{CH_4} \left(\frac{2n}{0,21} + 1 \right) + V_{C_2H_4} \left(\frac{3n}{0,21} + 1 \right) + V_{C_2H_2} \left(\frac{2,5n}{0,21} + \frac{1}{2} \right) + V_{C_aH_b} \left(\frac{n}{0,21} \left(a + \frac{b}{4} \right) - \frac{b}{4} \right) - V_{O_2} \left(\frac{n}{0,21} - 1 \right) \text{ Nm}^3$$

5.2.2. Combustión incompleta

Se dice que una combustión es incompleta cuando, mezclados con los humos de la combustión, aparecen gases combustibles, así como partículas sólidas de carbono no quemadas.

Generalmente, las causas de una combustión incompleta, pueden ser, o bien una insuficiente cantidad de aire, o bien una mezcla defectuosa del combustible con el comburente, aún en presencia de exceso de aire.

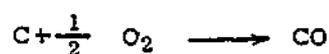
Así, por ejemplo, si la combustión es incompleta por defecto de oxígeno, durante el desarrollo de la misma baja la temperatura de las llamas, con lo cual, ciertos átomos de carbono y de hidrógeno no reciben la energía necesaria para la formación de radicales libres que conducen finalmente al CO₂ y H₂O. Esto hace que se presenten en la reacción, estados de equilibrio intermedios que tienen como consecuencia:

- Emisión de átomos de carbono o recombinación de átomos de carbono, que aparecen en los humos como materia particulada inquemada.
- Combinación de átomos de carbono y oxígeno en cantidades demasiado pequeñas y formación de CO.
- Recombinación de átomos de carbono e hidrógeno, lo que conduce a la formación de hidrocarburos ligeros y pesados.
- Emisión de hidrocarburos parcialmente oxidados (aldehídos, ácidos, etc.).

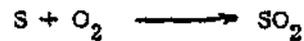
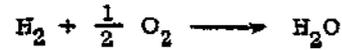
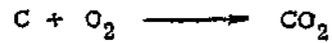
• Volumen y composición de los humos.

Para la determinación del volumen total y composición de los humos, se sigue un proceso similar al enunciado en el caso de combustión completa.

Al ser la combustión incompleta, se producirán las siguientes reacciones químicas:



Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./...33		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
S.O.I. MINER	5	CAPITULO: LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80



y el volumen total de humos será :

$$V_T = V_{CO} + V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2}$$

y sustituyendo estos valores y operando quedará :

$$V_T = 22,4 \left[\left(\frac{P_C}{12} + \frac{P_{H_2}}{4} + \frac{P_S}{32} - \frac{P_{O_2}}{32} \right) \frac{n}{0,21} + \frac{1}{2} (1 - x) \frac{P_C}{12} + \frac{P_{H_2}}{4} + \frac{P_{O_2}}{32} \right] m^3 N$$

5.3. PRINCIPALES CONTAMINANTES EMITIDOS

Sólidos

En los procesos de combustión, se vierten con los productos resultantes gran cantidad de partículas sólidas de cenizas, también denominadas cenizas volantes, formadas básicamente por carbones pulverizados y partículas inorgánicas raramente homogéneas formadas por muy diversos compuestos (silice, aluminio, óxido de hierro, óxido de calcio, óxido de magnesio, etc.) dependiendo de las características y procedencia de los combustibles. Estas partículas pueden quedar comprendidas en un diámetro medio aproximado de 15μ , y un 30-40% de ellas con un diámetro menor de 10μ .

Las partículas se encuentran bajo forma de cenizas volantes y hollines en el caso de combustión del carbón, manteniendo las cenizas trazas de metales. La combustión de los productos petrolíferos emite finas partículas sólidas carbonosas e hidrocarburos muy pesados, que pueden aglomerarse para formar pavesas.

Las emisiones de partículas dependen fundamentalmente del grado de reglaje de la instalación.

Los hollines y partículas sólidas carbonosas no salen en su totalidad a la atmósfera, ya que se depositan, en parte, en los conductos de humos, evacuándose de vez en cuando de forma más o menos brusca, durante las operaciones de deshollinado, en las que se producen emisiones relativamente breves, pero muy intensas, de humos negros.

Los hidrocarburos inquemados ligeros y partículas sólidas carbonosas pueden eliminarse en gran medida optimizando y controlando el proceso de combustión en el hogar de la caldera. Para ello es preciso disponer de quemadores debidamente homologados e instalados y de características adecuadas a la dimensión de la caldera, así como de chimeneas con el tiro adecuado y un conjunto de la instalación bien diseñado. Es conveniente que la instalación esté dotada de dispositivos automáticos de regulación del gasto de combustible y de admisión de aire. Por otra parte, es importante una regularidad en la viscosidad del combustible, en el caso de combustibles líquidos.

Gases

Junto con una gran cantidad de gases inocuos vertidos por los procesos de combustión, aparecen cantidades más pequeñas de otros gases que producen efectos nocivos y entre los cuales los más comunes son: anhídrido sulfuroso, anhídrido sulfúrico, monóxido de carbono, óxido nítrico, dióxido de nitrógeno, aldehídos y otros hidrocarburos.

Anhídrido Sulfuroso

El contaminante que caracteriza verdaderamente la combustión es el anhídrido sulfuroso, que procede de la combustión del azufre contenido en los combustibles. Dado que las técnicas de desulfuración de los gases de combustión se encuentran en sus comienzos prácticamente, todo el azufre contenido en los combustibles consumidos se arroja actualmente a la atmósfera en forma de SO_2 , SO_3 , nieblas de ácido sulfúrico o en cenizas volantes, quedando el resto incorporado a las escorias y cenizas sedimentadas.

De las medidas realizadas de las emisiones de SO_2 , aunque existen desviaciones apreciables de los valores teóricamente esperados a partir de los contenidos de azufre de los combustibles, es posible afirmar que el 90% del azufre del carbón aparece como óxidos de azufre en los gases de chimenea, de los que entre el 1 y el 2% se encuentran en forma de SO_3 , y el resto de SO_2 .

A pesar de que comparativamente la cantidad de SO_3 producida es pequeña, su presencia es importante porque drásticamente eleva el punto de rocío de los gases que rápidamente forman nieblas de ácido sulfúrico con la humedad atmosférica. Bajo determinadas condiciones atmosféricas esta niebla pasa de incolora a una neblina blanquecina con tonos azulados. Después de algunas horas o días en la atmósfera en que todo el SO_2 emitido es oxidado a SO_3 y a continuación pasa a H_2SO_4 , puede ser convertido eventualmente en sulfato que se deposita o es arrastrado por el agua de lluvia.

Como medida para la reducción del SO_3 , se propone una disminución del exceso de aire, hasta casi la proporción estequiométrica. Las ventajas que esto comporta, reside en la eliminación de la corrosión y de depósitos en la superficie de caldera. No obstante, esta técnica exige un control preciso de la relación aire-combustible y un excelente mezclado de los mismos para evitar la formación de humos.

Oxidos de Nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno, óxido nítrico (NO) dióxido de nitrógeno (NO_2), se forman por calentamiento a alta temperatura del nitrógeno y oxígeno atmosférico. La medida de la producción de NO en función de la temperatura de superficie de hornos, ha dado los siguientes resultados:

<u>Temperatura de superficie (°C)</u>	<u>NO (%)</u>
1.530	0,26
1.640	0,41
1.730	0,77
1.860	1,30
1.980	1,55
2.090	1,75

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / .35.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	5	CAPITULO: LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80

De los valores anteriores se deduce que la combinación de oxígeno y nitrógeno es tanto mejor en igualdad de otras condiciones, cuanto más elevada sea la temperatura, y cuanto mayor sea la cantidad de oxígeno presente en los gases de combustión.

Si los gases calientes de combustión se enfrían lentamente, los óxidos de nitrógeno formados se descomponen en oxígeno y nitrógeno. En los equipos usuales de combustión, la transferencia de calor se realiza rápidamente, con lo cual los óxidos de nitrógeno quedan fijados en los gases de escape.

El rango de concentraciones emitido por varios equipos es como sigue :

Centrales térmicas (combustible: gas o fuel oil)	400 - 700 ppm
Calderas	100 - 500 ppm
Incineradores	50 - 100 ppm

En Los Angeles, se ha estimado que de un 15 a un 35% de los óxidos de nitrógeno, se deben a la combustión de fuel oil y gas. El resto, corresponde a los escapes de los vehículos automóviles.

Se ha comprobado que la producción de NO de una caldera se ve afectada por la admisión de aire y la localización del quemador. Todo lo que suponga una reducción de zonas recalentadas, minimiza la formación de NO.

Dadas las elevadas temperaturas que se alcanzan en los cilindros de los motores de combustión interna, éstas constituyen una fuente importante de producción de NO_x, que puede cifrarse en concentraciones comprendidas entre 1.000 y 2.000 ppm, dependiendo del régimen de funcionamiento del motor.

Oxidos de Carbono

En teoría, cuando se realiza una combustión completa de carbón en el aire, los gases resultantes deben contener una proporción en volumen de 21% de dióxido de carbono y 79% de nitrógeno. La mayoría de los actuales combustibles contienen hidrógeno, de ahí que el gas resultante sea una mezcla de dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno.

No parece correcto considerar el CO₂ como un contaminante de la atmósfera terrestre, si se tiene en cuenta que el CO₂ forma parte del ciclo de la biosfera y, por tanto, existe en ella en cantidades importantes. Se estima que en la atmósfera hay 2.300 x 10⁹ toneladas de CO₂ y cerca de 150.000 x 10⁹ toneladas disueltas en el mar.

El hecho desfavorable, que puede suponer un factor de desequilibrio, reside en el incremento de CO₂ en la atmósfera como consecuencia de la combustión. Así, se calcula que el uso de combustibles en el transcurso de los años ha supuesto un vertido a la atmósfera de 300 x 10⁹ toneladas de CO₂. Esto representa aproximadamente el 10% de la cantidad de CO₂ existente en la atmósfera. Todos los combustibles utilizados en el mundo, hoy día, producen cerca de 9 x 10⁹ toneladas de CO₂ por año. Se estima que la fotosíntesis usa, aproximadamente 60 x 10⁹ toneladas por año, pero la respiración y la muerte animal y vegetal, revierte CO₂ a la atmósfera en el mismo ratio.

La concentración media de CO₂ en la atmósfera, se encuentra comprendida aproximadamente entre 300-320 ppm y se estima que los procesos de combustión están elevando esta concentración a razón de 1 ppm por año.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./36		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	5	CAPITULO: LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80

Existen muchas especulaciones acerca de los efectos de los aumentos de concentración CO_2 en la atmósfera en relación con el clima de la tierra. Algunas teorías indican que la energía radiada por la tierra es interceptada, en sus ondas largas, por el CO_2 , siendo reenviadas hacia la tierra, originando con ello un aumento progresivo de la temperatura del aire.

Por otra parte, los cultivos de vegetales se ven beneficiados con el incremento de CO_2 en el ambiente, consiguiéndose resultados espectaculares en cuanto a producción y en la reducción de los ciclos de cultivo.

El óxido de carbono es un producto de combustión incompleta de los diversos combustibles como consecuencia de un reglaje deficiente de las instalaciones de combustión.

En condiciones normales de funcionamiento y cuando la combustión se está produciendo con un rendimiento adecuado, la emisión de CO debida a fuentes estacionarias es mínima. Por tanto, desde el punto de vista de la contaminación del aire, el CO emitido por equipos fijos de combustión, raramente es causa de problemas. Además dado el valor energético del CO (4.347 Btu/lb de poder calorífico) difícilmente los usuarios de estos equipos dejarían de velar por una buena combustión, que se traducirá a su vez, en la eliminación de CO, en los gases de escape.

Las emisiones de CO a la atmósfera, provienen principalmente de los motores de gasolina, que suelen trabajar con un bajo exceso de aire. Se estima que su contribución en la contaminación por CO oscila alrededor del 64%.

Los motores Diesel, por el contrario, al trabajar con mayores coeficientes de exceso de aire, emiten menores cantidades de CO a la atmósfera.

Hidrocarburos

En las combustiones incompletas, se emiten también hidrocarburos policíclicos, especialmente hidrocarburos aromáticos policondensados, tales como los benzopirenos, pireno, perileno y benzoperilenos.

Las mediciones realizadas de estos contaminantes en ambientes urbanos de diversas ciudades americanas, han dado valores que oscilan entre 5,39 y 146,40 $\mu g/1.000 m^3$, correspondiendo los valores más altos a las mediciones realizadas en invierno.

La importancia de la emisión de hidrocarburos policíclicos radica más que en sus concentraciones, que como se ha visto son pequeñas, en la actividad cancerígena de algunos de ellos entre los que el 34 benzopireno es el mejor conocido.

Humos

Se define como humos la suspensión de partículas sólidas de carbón u hollín, resultantes de un proceso de combustión incompleta, suspendidas en los gases de escape. El tamaño medio de estas partículas, suele ser inferior a 1 μ (0,3 a 0,5 μ).

La emisión de humos es importante durante las operaciones de desbollinado de los equipos.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: ENGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./ 37..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	5	CAPITULO: LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80

En evitación de humos, es recomendable conseguir una buena pulverización de combustible y un mezclado adecuado del mismo con el aire.

5.4. COMBUSTIBLES

La naturaleza y cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera durante los procesos de combustión, dependen, entre otros, de los siguientes factores :

- Naturaleza del combustible.
- Características del equipo de combustión.
- Salida de humos.
- Régimen de funcionamiento y mantenimiento de la instalación, etc.

Los combustibles utilizados en las instalaciones especificadas anteriormente, pueden ser clasificados, según su naturaleza, en :

Combustibles sólidos

La utilización de combustibles sólidos (carbones) como fuente de energía directa para el usuario, está en clara regresión.

Las producciones previstas para 1.979 en nuestro país, son las que siguen :

<u>Hulla</u>	<u>10⁶ Tn</u>
Siderúrgica	4,6
Térmica	3,2
Usos domésticos y varios	1,3
<u>Antracita</u>	<u>10⁶ Tn</u>
Siderúrgica	0,1
Térmica	2,7
Usos domésticos y varios	2,0
<u>Lignito (exp. subt)</u>	<u>10⁶ Tn</u>
Térmico	7,9
Usos domésticos y varios	0,2
<u>Lignito (ciclo abierto)</u>	<u>10⁶ Tn</u>
Térmico	11,7

Desde el punto de vista de la contaminación, las características físicas y químicas de los carbones tienen una gran influencia sobre la calidad de la combustión y, particularmente, sobre la naturaleza y cantidad de los gases residuales. Estas características son :

- Contenido en azufre
- Materias volátiles
- Cenizas
- Humedad
- Granulometría

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./38..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	5	CAPITULO: LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80

La cantidad de azufre de nuestros carbones es, generalmente, inferior al 1%. Las materias volátiles oscilan en valores comprendidos entre el 3-8% de la antracita y el 30-50% de la hulla. La cantidad de cenizas queda comprendida en un margen del 5-15% (lignitos) hasta el 20% (antracitas).

En la tabla adjunta se muestra una estimación de la participación de los diversos combustibles en la emisión de contaminantes en Estados Unidos en 1.965.

Tipo de combustible	CONSUMO		CONTAMINANTES EMITIDOS 10 ⁶ t/año		
	10 ⁶ TEC	%	SO ₂	NO _x	Partículas
Carbón	300	25	16	3	7
Fuel-oil	300	25	4,8	2,1	0,5
Gas natural	600	50	--	1,5	0,1

De los resultados anteriores se deduce que el carbón es el combustible más contaminante, ya que con un consumo del 25% es responsable del 77% de SO₂, del 45% de NO_x y del 92% de las partículas emitidas a la atmósfera durante procesos de combustión.

Combustibles líquidos

El consumo global de combustibles líquidos aumenta continuamente, debido, fundamentalmente a su fácil manejo, distribución y consumo que les permite presentar indudables ventajas sobre los combustibles sólidos.

Las características más importantes que definen estos combustibles a efectos de la contaminación de la atmósfera son el contenido en azufre y la viscosidad.

En España, Campsa suministra los combustibles líquidos con los siguientes contenidos de azufre :

	<u>Azufre %</u>
Gasóleo A	0,6 max.
Gasóleo B	0,6 max.
Gasóleo C	0,6 max.
Fuel-oil pesado nº 1	2,5 max.
Fuel-oil pesado nº 2	3,6 max.

La viscosidad es una de las características más importantes de los combustibles líquidos en lo que se refiere a su almacenamiento, trasiego y utilización o combustión.

Para que se realice una buena combustión, es preciso una perfecta homogeneización de la mezcla combustible-aire, para lo cual es preciso, previamente, la pulverización del fuel por medio de un atomizador, etapa que va ligada estrechamente a las características de viscosidad del combustible.

Combustibles gaseosos

Estos combustibles (gas natural, gas ciudad, propano y butano comercial) son considerados como combustibles especiales o limpios.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./ .39..		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	5	CAPITULO : LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80

Debido a su facilidad de combustión y a un bajo contenido de azufre (mínimo de 0,04%) proporcionan una polución muy poco importante, pudiéndose considerar únicamente como contaminantes residuales a los NO_x .

5.5. CONTROL DE LAS EMISIONES DE PARTICULAS SOLIDAS PROCEDENTES DE LOS PROCESOS DE COMBUSTION

Las partículas sólidas emitidas con los gases resultantes de los procesos de combustión en equipos fijos, suelen encontrarse bajo la forma de cenizas volantes y hollines, caso de que el combustible sea carbón, o en partículas carbonosas muy finas, resultantes de combustiones incompletas, si se trata de combustibles líquidos.

Normalmente, la reducción de las emisiones de partículas sólidas, sólo suele realizarse en centrales térmicas o grandes instalaciones industriales que emplean carbón como combustible.

La reducción de estas emisiones puede llevarse a cabo mediante separadores mecánicos, precipitadores electrostáticos o separadores húmedos.

La utilización de separadores mecánicos es una forma simple y económica de separar las partículas sólidas de la corriente de un gas. El ciclón es un equipo sin elementos móviles en el cual una corriente gaseosa, que arrastra las partículas, es forzada a circular en un vértice en su interior. La fuerza centrífuga tiende a conducir las partículas suspendidas hacia las paredes del ciclón, donde chocan y pierden su velocidad y por gravedad o corrientes secundarias, caen al fondo del cono.

La eficacia de estos equipos está limitada por el tamaño de partículas. Llega a separar partículas de hasta 5μ de tamaño, pero su rendimiento disminuye rápidamente para partículas menores de 10μ de diámetro. Sus rendimientos medios de captación son del orden del 75%. Pueden trabajar a temperaturas superiores a los 1.000°C .

En centrales térmicas se suelen instalar conjuntamente con precipitadores electrostáticos y en algunos casos, con separadores húmedos.

Los rendimientos de separación pueden mejorarse con el empleo de multiciclones.

Los separadores húmedos o lavadores, son sistemas más complejos que se aplican para la separación de partículas sólidas, gotas y gases. La eliminación de cenizas volantes, en grandes instalaciones, puede llevarse a cabo mediante estos equipos, aunque tienen el inconveniente de enfriar los gases de escape, lo cual hace disminuir el tiro de la chimenea con lo que se dificulta el proceso de combustión. Los rendimientos de estos equipos pueden variar desde el 75% al 80% de las torres de lavado, hasta casi el 99% para los del tipo venturí.

El precipitador electrostático puede considerarse como el equipo más eficaz para la separación de partículas sólidas en los gases de chimenea. Es un sistema adecuado para trabajar con grandes caudales de gas de forma continua, eliminando las partículas más pequeñas y con elevados rendimientos.

Puede adaptarse para trabajar a temperaturas de hasta 500°C , y en conexión con separadores mecánicos y lavadores.

Los rendimientos de la combinación ciclón-electrofiltro en centrales térmicas alimentadas con carbón, son del

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2 / 40..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.L. MINER	5	CAPITULO: LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80

orden del 96%, y el electrofiltro por separado, puede tener una eficacia de captación del 85% aproximadamente.

Son equipos de elevado costo de instalación, lo que hace que su adopción sólo sea viable en grandes instalaciones. El costo de funcionamiento y mantenimiento es pequeño.

5.6. MÉTODOS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE SO₂

Uno de los mayores problemas que han de ser resueltos en la combustión de combustibles sólidos y líquidos, es el desarrollo de métodos que permitan reducir las emisiones de SO₂ por chimenea a niveles admisibles. Algunos de los métodos que se proponen son los siguientes:

Utilización de combustibles limpios

Cualquier política que se adopte de cara a reducir la emisión de contaminantes en instalaciones de combustión fija, ha de contemplar como primera posibilidad, la utilización de combustibles con bajo contenido de azufre.

Esta solución no siempre es posible, porque depende de la procedencia de los combustibles y del costo adicional que supone el proceso de desulfuración.

Por ejemplo, los crudos que proceden de Venezuela y Arabia, tienen un contenido de azufre comprendido entre el 2,5% y el 3,5%, mientras que los procedentes del Norte de Africa, tienen contenidos de azufre mucho más bajos (alrededor del 0,1%).

Existen en desarrollo procesos para la desulfuración de carbones a iniciativa de la industria (ejemplo: la Combustion Engineering Inc.) y de organizaciones estatales, sin embargo, los expertos opinan que tales procesos no alcanzarán su comercialización hasta la década de los 80.

Por lo que respecta a los combustibles líquidos, existen métodos de desulfuración que se aplican en los productos de destilación directa del petróleo, tales son los procesos de endulzamiento y recuperación de azufre de las fracciones más ligeras del petróleo que tratan de eliminar el SH₂ y los mercaptanos, o el proceso de refino con hidrógeno que, mediante una hidrogenación catalítica aplicada a los productos de destilación directa o de cracking del petróleo, permite separar el azufre y otros contaminantes.

Procesos de desulfuración de los gases de combustión

Los sistemas de desulfuración de gases de combustión (FGD) se han desarrollado en los Estados Unidos en la última década y son aplicables en grandes instalaciones de combustión fija, o más concretamente, a las centrales térmicas.

Después de un largo período de experimentación en plantas piloto, se han seleccionado 5 procesos como más idóneos para su adopción. Estos, a su vez, pueden considerarse divididos en dos grupos:

Sistemas regenerables:

Estos procesos se basan en la absorción del SO₂ contenido en los gases de combustión por un absorbente y la posterior regeneración y recirculación de éste para la realización de un nuevo ciclo. El SO₂, liberado en la

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2 / .41..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	5	CAPITULO: LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80

etapa de regeneración es recuperado, generalmente, como ácido sulfúrico o azufre.

Entre estos procesos se encuentran :

. Lavado con lodos de MgO.

Los gases de combustión son lavados en dos etapas de un venturi scrubbers, utilizándose primero agua para la eliminación de partículas y, a continuación, lodos recirculados de MgO (pH 7, 5-8, 5) para la eliminación de SO₂. En una planta de reciclado, el sulfato de magnesio formado, es reducido para obtención de MgO y SO₂. En una planta anexa, el SO₂ es oxidado y convertido en SO₄H₂.

. Lavado con solución de sodio.

En este sistema, los gases de escape son lavados mediante agua y sales de sodio para la eliminación de la materia particulada y el SO₂, respectivamente. El SO₂ regenerado es recuperado como azufre elemental por reducción con metano.

. Oxidación catalítica.

Los gases de combustión, son primeramente limpiados de materia particulada por medio de un precipitador electrostático, para posteriormente ser oxidados catalíticamente a SO₃. La reacción con agua lo convierte en H₂SO₄.

- Sistemas no regenerables :

. Lavado con lodos de carbonato cálcico.

Los gases de combustión pasan por un venturi scrubbers de dos etapas, donde son lavados con agua y lodos recirculados de carbonato cálcico. Se obtiene un sub-producto a base de sulfito y sulfato cálcico que puede emplearse como material de relleno.

. Lavado con lodos de óxido cálcico.

Sistema similar al anterior, que emplea cal en vez de piedra caliza.

5.7. LEGISLACION

Veamos las referencias que la legislación vigente hace al tema de la contaminación atmosférica en relación con las fuentes de combustión fijas.

El Reglamento sobre utilización de productos petrolíferos para calefacción y otros usos no industriales (de 21 de Junio de 1.968), establece los niveles máximos de emisión de contaminantes en :

- Partículas: 250 mg/m³N
- Dióxido de azufre: 0,2% en volumen.
- Anhídrido carbónico: 10-13% en volumen.

El Decreto de 6 de Febrero de 1.975 por el que se desarrolla la Ley de 22 de Diciembre de protección del ambiente atmosférico, establece los siguientes niveles de emisión para las instalaciones de combustión :

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 42.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	5	CAPITULO: LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80

Emisión de SO₂

	mg/Nm ³ Inst. nuevas y existentes	Previsión 1977	Previsión 1980
Instalaciones que emplean gas-oil doméstico o fuel-oil BIA (bajo índice de azufre) ..	1.700	1.700	850
Inst. que emplean fuel-oil pesado nº 1	4.200	2.500	1.700
Inst. que emplean fuel-oil pesado nº 2	6.800	5.000	3.400

El contenido en CO de los gases de combustión, para cualquier potencia y combustible, no será superior a 1.445 ppm.

Opacidad

En cuanto los índices de ennegrecimiento para instalaciones de cualquier potencia que utilizan gas-oil o fuel-oil, no deberán sobrepasar los valores que a continuación se indican, salvo tres períodos inferiores a diez minutos cada día.

	Escala Bacharach	Escala Ringelmann
Instalaciones que utilicen gas-oil o fuel-oil doméstico	2	1
Instalaciones que utilicen fuel-oil pesado nº 1 o BIA (bajo índice de azufre)	4	2
Instalaciones que utilicen fuel-oil pesado nº 2	5	2, 5

Para las instalaciones de combustión que utilizan carbón, se establecen los siguientes niveles de emisión.

Emisión de SO₂

Para cualquier potencia y tanto para instalaciones existentes como nuevas : 2.400 mg/Nm³, para las instalaciones que quemen hulla o antracita. Para las que empleen lignitos, el límite de emisión máximo será de 6.000 mg/Nm³.

Emisión de partículas sólidas

	mg/Nm ³		
	Instalaciones nuevas	Instalaciones existentes	Previsión 1980
Potencia inferior a 500 termas/h.	350	500	250
Potencia igual o superior a 500 termas/h.	250	400	150

Opacidad

No se superará el número 1 de la Escala de Ringelmann, o el número 2 de la Escala de Bacharach. Este índice, podrá alcanzar valores no superiores a 2 de la Escala de Ringelmann, y 4 de la Escala de Bacharach, en períodos de dos minutos cada hora. Durante el período de encendido (estimado como máximo en dos horas), no se sobrepasará el valor 3 de la Escala de Ringelmann, o el 6 de la de Bacharach, obtenido como media de cuatro determinaciones escalonadas a partir de quince minutos del comienzo.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./43..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	5	CAPITULO: LA COMBUSTION COMO FUENTE DE CONTAMINACION	01	10	80

Por lo que respecta a las características, calidades y condiciones de empleo de los combustibles, quedan recogidas en el Decreto 2.204/1975, de 23 de Agosto.

En él se definen las siguientes categorías de combustibles :

- Combustibles especiales o limpios, en lo que al contenido de azufre se refiere, la energía eléctrica, el gas natural, los gases licuados del petróleo (GLP), los gases manufacturados y otros combustibles con contenido de azufre igual o inferior al 0,7% en peso.

- Combustibles de menor poder contaminante, además de los expresados en el número anterior, los combustibles líquidos con contenido de azufre igual o inferior al 1% y los combustibles sólidos de calidad nº 1 (contenido de azufre \leq 1%, volátiles < 10%, cenizas < 12%).

En cuanto a los combustibles líquidos, limita los contenidos de azufre y establece un calendario de reducción del mismo.

	Contenido en azufre %			
	1978	1979	1980	1985
Gasóleo G	0,7	0,5	0,5	0,5
Fuel-oil pesado nº 1	2,5	2,0	1,8	1,0
Fuel-oil pesado nº 2	3,6	3,6	3,6	3,6

Otras disposiciones recogidas en el Decreto, son las siguientes :

- En las zonas declaradas de "atmósfera contaminada" se podrá exigir respecto de determinadas instalaciones industriales, la utilización de combustibles o fuentes de energía de menor poder contaminante, y obligar a otras instalaciones que tengan una reserva de combustibles especiales cuando se declare y mientras dure la situación de emergencia.

- En instalaciones industriales que se encuentran situadas a menos de 2 km. de un núcleo urbano superior a los 10.000 habitantes, no podrán consumirse combustibles que contengan más del 3% de azufre.

- Se prohíbe el empleo de fuel-oil pesado en quemadores de potencia máxima nominal inferior a 500 termias/hora (580 kw), así como el empleo de fuel-oil pesado nº 2, en quemadores de potencia máxima nominal inferior a 1.000 termias/hora (1.160 kw).

- En los generadores de calor de potencia máxima nominal inferior a 500 termias/hora, no podrá consumirse carbón de calidad inferior a la nº 2 (contenido en azufre \leq 1,2%, cenizas < 15%), y en los generadores de calor de potencia inferior a 1.000 termias/hora, no podrá utilizarse carbón de calidad inferior a la nº 3 (contenido en azufre \leq 1,5%, cenizas \leq 25%, humedad < 10%). En las zonas de atmósfera contaminada, sólo podrá quemarse carbón de la calidad nº 1 en actividades domésticas y de servicios, y de las calidades nºs. 1 y 2, en las actividades industriales.

Manual de Ingeniería Ambiental	3	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2:2/.44..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

El objeto del presente capítulo, es el de presentar una visión general de las distintas etapas de un problema de contaminación atmosférica ocasionado por la emisión de contaminantes gaseosos de origen industrial.

Dada la extensión y complejidad del tema, los distintos aspectos del problema son tratados en forma descriptiva, habiendo dedicado una mayor profundidad de exposición a los aspectos referentes al cálculo de altura de chimeneas, difusión de contaminantes y concentraciones de inmisión en la zona.

Se incluye, asimismo, una aplicación numérica a un caso de difusión atmosférica en el que se pone de manifiesto la importancia que tiene, para una correcta difusión de contaminantes, la obtención de adecuadas condiciones y características del gas a la salida del foco emisor.

Se ha pretendido destacar, por tanto, la importancia de un enfoque global del problema, puesto que la resolución de un problema de este tipo puede subdividirse en siete etapas principales, perfectamente interconexiónadas, de forma que cualquier acción sobre una de ellas, repercute directamente en las restantes. Dichas etapas son las siguientes:

- Fase I - Sistemas de extracción local.
- Fase II - Acondicionamiento de gases.
- Fase III - Depuración primaria.
- Fase IV - Depuración final.
- Fase V - Aspiración.
- Fase VI - Cálculo de chimeneas.
- Fase VII - Estudios de difusión y concentraciones de inmisión.

Es preciso actuar, por ello, sobre el conjunto de variables que influyen en el problema, con el objeto de cumplir las disposiciones legislativas vigentes en las condiciones más ventajosas, tanto desde el punto de vista técnico, como económico.

Desde un punto de vista legal, se ha de conseguir un escape en la chimenea de salida de efluentes con una concentración en contaminantes prefijada, y de tal forma, que la concentración ambiental producida por la industria no supere unos valores igualmente legislados.

El Ministerio de Industria ha dispuesto un límite de emisión C_e , expresado en mg/Nm^3 , para los principales contaminantes industriales, con valores propios para actividades industriales específicas. Dichos valores C_e corresponden a los límites máximos admisibles en cada caso.

La delimitación de los niveles ambientales o de inmisión C_i ($\mu g/Nm^2$) ha sido competencia del Ministerio de la Gobernación, estableciéndose, asimismo, los valores máximos de concentración que pueden admitirse.

Es preciso indicar, por último, que el cumplimiento de las normas vigentes en relación con los valores C_e , no presupone el cumplimiento de los niveles C_i , a no ser que, a lo largo de las distintas fases antes enumeradas, se haya ido actuando de forma a asegurar, de acuerdo con la topografía y microclima de la zona, que los efluentes sean emitidos en condiciones de difusibilidad convenientes.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2:2 / 45...		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Fase I - Sistemas de extracción local

La resolución de un problema de contaminación industrial atmosférica, comienza con el estudio del proceso productivo, puesto que la emisión de contaminantes se puede reducir actuando directamente sobre dicho proceso, solución más económica y sencilla que la de actuar a posteriori. Incluso en el supuesto de no poderse reducir, siempre es posible lograr que su emisión se realice de forma que su posterior depuración sea más sencilla.

Hay que establecer qué tipo de contaminantes se van a producir en cada punto del proceso y sus características fisicoquímicas. Para gases nocivos que se desprendan conjuntamente, se deberá estudiar la posibilidad de su depuración selectiva y posterior reincorporación al proceso, caso en el que se puede considerar que forman parte del propio proceso productivo.

Generalmente, tanto para el caso de contaminantes en fase sólida, como líquida (nieblas) o gaseosa, la depuración se realiza por separación de dichos contaminantes del caudal de aire en el que han sido captados.

El caudal de gases a depurar puede estar determinado por el propio proceso. -es decir, se depuran todos los gases efluentes-, o bien se determina de forma que se logre captar todos los contaminantes producidos.

Los sistemas contaminantes pueden clasificarse en dos categorías: sistemas de tipo abierto o de tipo cerrado.

Un sistema es abierto cuando en un punto, o serie de puntos, se produce un desprendimiento de contaminantes que, de no ser captados, se difunden en todas direcciones.

La solución exige el diseño de una campana de aspiración ubicada sobre el punto emisor que permita aspirar, mediante un colector, un caudal Q , a determinar en cada caso, que asegure la captación de todos los contaminantes. Dicho caudal ha de ser el mínimo que asegure la captación de contaminantes, ya que, lógicamente, un caudal excesivo presentaría los siguientes inconvenientes :

- Posibilidad de captar no sólo los productos contaminantes, sino de aspirar parte del producto del proceso. En este caso, además de ser antieconómico por la pérdida de producto, la depuración sería después más costosa, por resultar gases con mayor concentración en contaminantes.

- Un mayor coste de la instalación depuradora, al tener que tratar un caudal mayor del necesario. El coste de la depuración depende muy directamente del caudal a depurar.

Se dice que un sistema es cerrado cuando es el propio proceso productivo el que determina el caudal de gases residuales, con una cierta concentración de contaminantes. En este caso existe un caudal ya determinado que sería preciso depurar, si bien se puede actuar sobre el proceso, a fin de reducir su cuantía al mínimo posible.

Una criba vibrante puede ser un ejemplo del sistema abierto, donde es el especialista quien debe calcular un caudal de aspiración que elimine el polvo producido.

El efluente que se desprende de un reactor es, por el contrario, un ejemplo de proceso cerrado.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2-2./ .96..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

En general, los caudales captados no son depurados individualmente en cada punto contaminante de un proceso, sino que, siempre que es posible, se depuran en forma conjunta, por ser una solución más económica, o se efectúa, al menos, una agrupación de caudales en dos o tres tipos, depurándose independientemente cada uno de ellos.

Para poder adoptar un esquema de depuración conjunta, será preciso considerar :

- Posibilidad de segregar aquellos caudales con productos contaminantes muy específicos y cuya depuración independiente resulta más fácil y económica.
- Complejidad de la red de aspiración resultante (pérdida de carga, facilidad de regulación, etc.).
- Condiciones físico-químicas y de concentración del caudal total resultante.
- Condiciones de difusibilidad de los gases después de depurados, atendiendo a las condiciones físico-químicas del caudal total.
- Necesidad de instalar un pre-depurador o/y un elemento de acondicionamiento de gases antes de la depuración.
- Existencia de caudales parciales potencialmente explosivos.
- Tipo de depurador final a instalar.
- Granulometría de las partículas sólidas contenidas en el escape de la chimenea, atendiendo a su difusibilidad.

Así pues, en el caso de la Figura 2.6.1., si fuera conveniente segregar tres de los ocho caudales existentes, sería preciso estudiar la posibilidad de depurar en forma conjunta los tres caudales segregados.

Esta primera fase I de trabajo comprendería, entre otros, el análisis de los siguientes aspectos :

- Determinación de los caudales de aspiración en cada punto de emisión de contaminantes.
- Determinación de las condiciones físico-químicas, tanto de los caudales aspirados como de los contaminantes en él disueltos.
- Diseño de las campanas necesarias para la aspiración de los caudales calculados:
 - . campanas para gases fríos.
 - . campanas para gases calientes ($t \geq 200^{\circ}\text{C}$).
 - . canopys y campanas laterales para sistemas de ingeniería, etc.
- Cálculo de la presión de cada campana, para lograr la aspiración de los caudales requeridos.
- Cálculo de las redes de aspiración.
 - . diámetros y espesores de tuberías.
 - . velocidad de los gases, según tipo de contaminante captado (abrasión, o depósito), temperatura de los gases, higrometría, etc.
 - . pérdidas de carga.

- temperatura, humedad, concentración y demás condiciones físico-químicas del caudal total.
- pérdidas de calor a lo largo de las tuberías.
- equilibrado y sistemas de regulación de la red de aspiración.

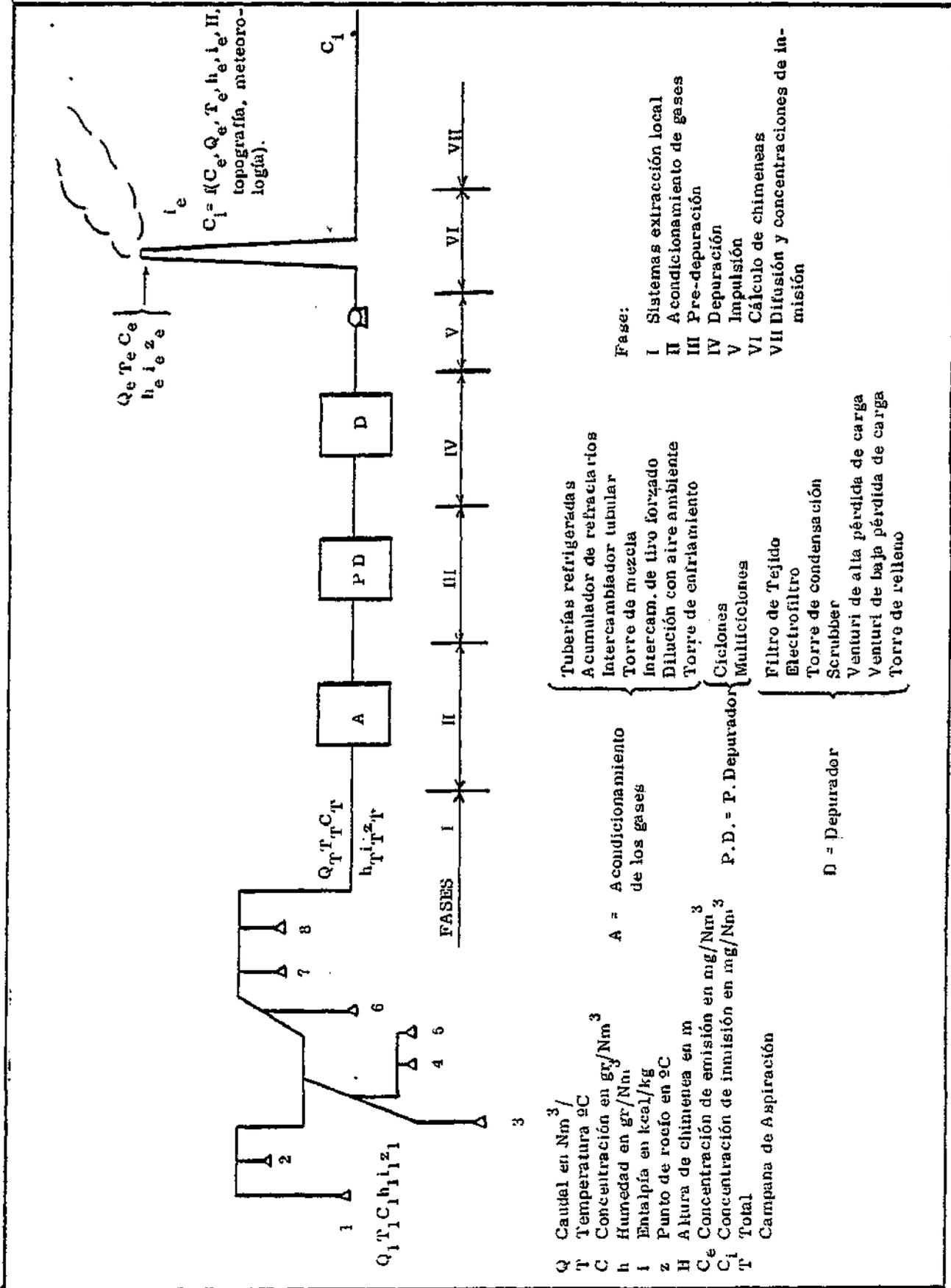


Figura 2.6.1.- Fases de resolución integral de un problema de depuración de gases.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./48..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Fase II - Acondicionamiento de los gases

Una vez cubierta la primera fase, se dispone de un caudal final que es preciso depurar. A partir de aquí, y durante las fases siguientes, se estudiará la depuración de un único caudal, ya que si en la fase I se hubiese hecho alguna segregación de caudal, lo que se expone a continuación sería también perfectamente válido para cada caudal segregado.

Los parámetros que definirían este caudal serían :

- Q_T - caudal, en $Nm^3/seg.$
- t_T - temperatura, en $^{\circ}C.$
- C_T - concentración de cada contaminante, en $gr/Nm^3.$
- H_T - humedad del gas, en $gr/Nm^3.$
- h_T - entalpía, en $kcal/kg$ o $kcal/Nm^3.$
- Z_T - punto de rocío, en $^{\circ}C.$

Esta corriente resultante, puede incluir distintos contaminantes, cuyas concentraciones parciales es preciso conocer con objeto de elegir el sistema depurador más conveniente. Una vez elegido él o los depuradores más idóneos, es en esta fase donde es preciso acondicionar los gases de manera que lleguen en las mejores condiciones posibles a la fase IV (Depuración Final), tanto desde el punto de vista de su depuración, como de difusibilidad de los gases efluentes.

No es tan sólo, por tanto, una cuestión de rendimiento o escape del depurador la que se ha de tener en cuenta, ya que la Administración obliga no sólo a cumplir C_e , sino también los niveles C_i .

Puesto que las C_e vienen expresadas en unidades de concentración (mg/Nm^3), el caudal final que se obtenga, tras el acondicionamiento de los gases, tendrá una importancia fundamental en las concentraciones de entrada en el depurador.

Elo repercutirá directamente en aquellos depuradores cuyo diseño esté fundamentalmente definido por la obtención de un determinado rendimiento; los electrofiltros, por ejemplo.

El problema que más frecuentemente se plantea en el acondicionamiento de los gases suele ser la reducción de la temperatura a unos niveles que permitan la utilización del depurador seleccionado. No obstante, en ciertos casos el problema es justamente el contrario, tratándose de elevar dicha temperatura por encima del punto de rocío de tal forma que se eviten condensaciones en el depurador elegido.

A veces, de lo que se trata en el acondicionamiento de los gases es de variar fundamentalmente una sola propiedad, como la resistividad en el caso de los electrofiltros, existiendo un sistema alternativo de soluciones: disminución de la temperatura, aumento de la humedad, empleo de aditivos (K_2O por ejemplo), etc.

El enfriamiento de los gases se realiza normalmente mediante :

- tuberías refrigeradas por agua.
- acumuladores de refractarios.
- intercambiadores tubulares atmosféricos.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./49..		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO : PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

- convección forzada.
- dilución con aire ambiente.
- torres de enfriamiento.
- torres de mezcla.

o por combinación de varios de estos procedimientos.

En esta fase, se deberán analizar los costes de operación y aspectos del sistema de acondicionamiento tales como : dimensionamiento, características físico-químicas del caudal final, consumo de agua, en los sistemas húmedos, pérdidas de carga, caudales y concentraciones finales, sistemas de regulación, etc.

Finalizada esta etapa, se dispone ya de un caudal en condiciones de ser tratado por el depurador elegido.

Fase III - Depuración Primaria

En muchas aplicaciones, el empleo del depurador principal está limitado por una concentración máxima de entrada al mismo, o bien es aconsejable reducir dicha concentración que, aún estando por debajo de la máxima admisible, conduciría a un depurador muy costoso. En este caso es conveniente el empleo de depuradores previos, los cuales presentan un escape excesivo para ser utilizado como depuradores finales pero resultan, en cambio, económicos si se utilizan como depuradores primarios, al permitir, después, diseñar un depurador final más reducido, de tal forma que el ahorro obtenido compense la instalación del pre-depurador. Una extensa gama de separadores mecánicos, que antes se utilizaban como depuradores finales, han pasado a la categoría de pre-depuradores en vista del rigor de la nueva reglamentación.

En este caso se encuentran los ciclones, muchos multiciclones y algunos venturís de baja pérdida de carga.

No obstante, la pre-depuración se utiliza casi únicamente en el caso de eliminación de partículas sólidas (polvo), por lo que su ámbito puede limitarse al de ciclones y multiciclones.

Para estos depuradores, la fase III comprendería :

- elección del tipo de pre-depurador (uno, varios ciclones o un multiciclón).
- sistemas para aumentar el rendimiento. Reciclo.
- dimensionamiento del equipo.
- pérdida de carga.
- rendimiento según granulometría.
- sistemas de repartición de gases.
- caída de temperatura. Calorifugado. Corrosión.
- sistemas de evacuación del polvo separado.
- sistemas de autoimpieza de tolvas.

Fase IV - Depuración Final

Esta es la fase sin duda más importante, en relación con la cual ya se había tomado una decisión previa en la fase II, al realizar el acondicionamiento de gases.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./...50.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Ahora, determinado el caudal a depurar, su concentración en contaminantes y sus características físico-químicas, es preciso diseñar un equipo capaz de proporcionar una C_e que satisfaga la presente legislación y produzca unos efluentes en las mejores condiciones para satisfacer los valores C_1 .

Según el tipo de problema, se podrá considerar una cierta gama de depuradores válidos, entre los que será preciso seleccionar aquel que reúna las mejores características, atendiendo, entre otros, a aspectos tales como :

- escape igual o inferior a C_e .
- condiciones de difusibilidad de los gases efluentes, tras la depuración.
- potencia instalada, pérdidas de carga y consumos de agua, disoluciones de lavado, aire comprimido, etc.
- efluentes líquidos contaminados (importante).
- inversión inicial y gastos de operación y mantenimiento: existencia de piezas vitales en movimiento o sujetas a posibles averías.

Una vez determinado el tipo de depurador más conveniente, que podría clasificarse genéricamente en tres grandes grupos -filtro de tejido, electrofiltro, húmedo- se procederá al dimensionamiento del mismo.

Es preciso hacer constar que, a veces, cuando se trata de eliminar más de un contaminante en fase gaseosa, la depuración ha de realizarse mediante dos o más depuradores en serie, que eliminan por etapas cada contaminante.

En el diseño de filtros de tejido, es preciso tener en cuenta :

- filtro de bolsas o filtro de mangas (elección).
- superficie específica en m^2 tejido/ m^3/s de gas a depurar, en función del tipo de tejido, aplicación, sistema de limpieza y temperatura de trabajo. Vida media del tejido empleado.
- calorifugado y pérdidas de carga.
- tipos de tolvas de recogida, según el tipo de producto a captar y sistemas de evacuación y recogida del polvo captado, según el ciclo de trabajo: registro de levas, trampilla exclusiva, obturador rotativo.
- elección del tipo de limpieza: aire a presión, aire modulado, sacudida mecánica, jet, ultrasónico o combinación de procedimientos.

En el caso de decidirse por el empleo de un electrofiltro, su diseño deberá tener en cuenta :

- velocidades de paso y migración. Tiempo de estancia.
- rendimiento exigido para alcanzar C_e y granulometría del polvo residual.
- número de campos y de rectificadores.
- superficie específica por campo y dimensiones generales.
- tensión en vacío y efectiva, según aplicación, intensidad de placa y consumo total de energía.
- sistemas de repartición de gases. Pérdida de carga.
- tipo de electrodo de emisión.
- sistema de limpieza.
- regulación del sistema eléctrico. Flexibilidad.

Los depuradores de vía húmeda (scrubers) pueden ser del tipo : torre de relleno, venturi de alta o baja pérdida de carga, torre de condensación, lavador de efecto venturi combinado con otro efecto, etc.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./51...		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Según el tipo de lavador seleccionado en función de las características de contaminante a depurar, se procederá al cálculo de :

- Rendimiento exigido para alcanzar C_e .
- Caudal final y condiciones físico-químicas de los gases efluentes.
- Pérdida de carga y consumos de energía, agua, etc.
- Sistema de regulación y posibilidades de reciclo.
- Sistemas de extracción de lodos y de depuración del efluente líquido.

En los lavadores húmedos se produce un traspaso de la contaminación del aire al agua. Es, pues, importantísimo tener en cuenta este hecho a la hora de diseñar un depurador de gases húmedo, para procurar obtener unos efluentes líquidos contaminados en unas condiciones tales que su posterior depuración resulte fácil y económica.

En el caso de sistemas secos, se plantea el problema de los residuos sólidos separados en los depuradores.

Es claro, por tanto, que en la selección de un equipo depurador, el triángulo aire-agua-sólidos, es un factor de primerísima importancia y que no es posible diseñar en un vértice de espalda a los otros dos, pues carecería de sentido si no se contemplara incluido en el contexto general del problema ecológico de la fábrica en todas sus vertientes.

Fase V - Aspiración

Hasta ahora, a lo largo de las cuatro etapas de trabajo ya analizadas, se ha estado manejando un caudal de gases que ha ido sufriendo sucesivas alteraciones físico-químicas, lo que ha repercutido en sus características.

Partiendo de la campana de aspiración, ya comentada al describir los sistemas de extracción local, el gas ha ido pasando por cada una de las siguientes etapas, en las que ha sufrido las correspondientes pérdidas de carga. El grupo moto-ventilador del sistema impulsor -situado generalmente después de la depuración final, al objeto de preservarle de los efectos nocivos que los gases contaminados podrían ocasionarle- ha de proporcionar energía para vencer dichas pérdidas de carga (red de tuberías, conductos y piezas de unión) y para :

- Asegurar la presión necesaria en cada punto, para obtener el caudal de aspiración deseable.
- Vencer la pérdida de carga en la chimenea.
- Asegurar una velocidad de salida por la chimenea que permita una buena sobreelevación del penacho y facilite el mecanismo de difusión.

Hay que resaltar que, a lo largo de cada fase, se van produciendo cambios, tanto en el propio caudal como en sus condiciones físico-químicas, por lo que el cálculo de las pérdidas de carga es una labor delicada y, en ciertos casos (fuertes variaciones de caudal, como consecuencia de rápidos enfriamientos), de gran complejidad.

Sin embargo, el buen funcionamiento del conjunto de la instalación exige un cálculo perfecto de dichas pérdidas de carga y, posteriormente, del grupo moto-ventilador necesario.

En su diseño se ha de tener en cuenta, por tanto, además del caudal y de las características del fluido que va a circular a su través (temperatura, presión, composición de gases, etc.) aspectos tales como :

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2:2/.52..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

- Tipo de ventilador (axial, centrífugo, para gases sucios, etc.).
- Localización del punto de presión cero y ubicación del ventilador.
- Diámetro del rodete y tipo de álabes.
- Rendimiento, poder manométrico y orificio equivalente.
- Potencia absorbida, en arranque y en marcha normal. Sistemas de arranque y transmisión.
- Velocidad de giro (rpm) y tipo y características del motor de accionamiento.

El cálculo de la pérdida de carga por fase, puede complicarse extraordinariamente cuando, por las condiciones higroscópicas de los contaminantes captados, se hace necesaria la inyección, en cada boca de aspiración, de cierta cantidad de agua que lave internamente las tuberías, impidiendo el depósito de polvo y las obstrucciones correspondientes. En este caso, es también mucho más difícil el equilibrador de la red.

Fase VI - Cálculo de chimeneas

Hasta hace muy poco tiempo, no se había concedido prácticamente ninguna importancia al cálculo de la altura de chimeneas desde el punto de vista del impacto ambiental que los contaminantes por ellas vertidos producen en su entorno. La única preocupación formal se limitaba a la consecución de un buen tiro y a sobrepasar ligeramente la altura de los edificios más próximos.

En la actualidad, sin embargo, además de asegurar un buen tiro, se trata de que la chimenea permita una buena dispersión de contaminantes, con objeto de lograr unos valores de admisión (C_p) acordes con la normativa vigente. Se comprende, pues, que en su cálculo intervengan todos aquellos parámetros que influyen en el proceso de difusión.

En el caso más general, se debe de tener en cuenta:

- Cantidad de contaminante vertido y sus características físicas y químicas.
- Caudal de gases emitido, composición y propiedades termodinámicas.
- Microclima y topografía de la zona.
- Valor de la contaminación de fondo ya existente en su zona de influencia.
- Valor máximo admisible para cada contaminante vertido, en el entorno considerado.

El método de cálculo de la altura física de una chimenea depende de la importancia cuantitativa, y en ciertos casos, cualitativa, del caudal de gases y concentración en contaminantes por ella emitidos.

La serie de parámetros a considerar varía con la exactitud que cada caso en particular requiera, en función de la importancia del foco emisor.

Conjugando la normativa española con las normas de la ASME, se establecen tres categorías en el cálculo de la altura de chimeneas, atendiendo tanto a la cantidad y calidad de contaminantes vertidos, como al tamaño de la chimenea resultante.

Téngase presente que la difusión de los contaminantes después de su emisión, está íntimamente ligada a las condiciones de estabilidad o turbulencia atmosférica del aire en cuyo seno se realiza el proceso de dispersión, y que dichas condiciones dependen, entre otros factores, de la altura sobre el nivel del suelo.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./...33.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.L. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

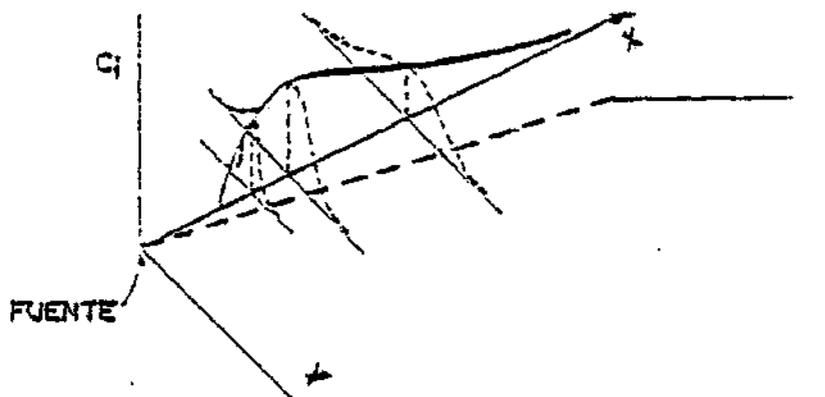
De lo expuesto, se justifica la división del método de cálculo en las tres categorías siguientes :

- Chimeneas de tamaño medio.
- Chimeneas de hasta 300 m. de altura.
- Chimeneas de gran altura.

La altura de la chimenea es un factor de primerísima importancia, como posteriormente se verá, en la difusión de los contaminantes, si bien no interviene en los cálculos como tal, siendo sustituida por la altura efectiva de chimenea. Este nuevo parámetro resulta de añadir a la altura física, la sobreelevación que, por encima de ella, experimenta el penacho, como consecuencia del impulso vertical convectivo de los gases (figura - 2.5.2.). Es decir: $H = h + \Delta h$, siendo Δh , la sobreelevación del penacho.



ALTURA EFECTIVA DE CHIMENEA



DISTRIBUCION DE CONCENTRACIONES (GAUSS)

Figura. - 2.5.2.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./ 54		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO : PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Para la primera categoría, chimeneas de tamaño medio, la orden de 18 de Octubre de 1.976 (BOE nº 290 de 3-12-76), determina la norma de cálculo de la altura física y el campo de aplicación de dicha normativa.

La fórmula de cálculo de la altura física de la chimenea es la siguiente :

$$H = \sqrt{\frac{A Q F}{C_M}} \sqrt[3]{\frac{N}{V \cdot \Delta T}}$$

expresándose H en metros y siendo :

- A : parámetro meteorológico que refleja las condiciones climatológicas del lugar.
- Q : caudal máximo de sustancias contaminantes (kg/h.).
- F : coeficiente sin dimensiones relacionado con la velocidad de sedimentación de las impurezas en la atmósfera.
- C_M : concentración máxima de contaminantes a nivel del suelo, como media de 24 horas (mg/Nm³).
- N : número de chimeneas, incluida la que es objeto de cálculo, situadas a una distancia horizontal inferior a 2 H del emplazamiento de la chimenea de referencia.
- V : caudal de gases emitidos (m³/h).
- ΔT : diferencia entre la temperatura de los gases de salida de la chimenea, y la temperatura media anual del aire ambiente en el lugar considerado (°C).

En la citada orden, se incluyen las normas de cálculo de cada uno de estos parámetros.

Esta fórmula de cálculo es de aplicación para aquellas chimeneas que emitiendo un máximo de 720 kg/h de cualquier gas contaminante, o 100 kg/h de partículas sólidas, el penacho de humos, tenga un impulso vertical convectivo que cumpla la siguiente expresión :

$$\Delta T > 188 \cdot \frac{v_s^2}{H^2} \sqrt{S}$$

siendo :

- ΔT : diferencia en °C entre la temperatura de salida de humos en la boca de la chimenea y la temperatura media de las máximas del mes más cálido, en el lugar.
- v_s : velocidad de salida de los gases, en la boca de la chimenea (m/s).
- H : altura que, según la fórmula propuesta, resulta para la chimenea (m).
- S : sección interior mínima de la boca de salida de la chimenea (m²).

Aunque, aparentemente, el problema del cálculo de la altura física de la chimenea queda completamente resuelto en estos casos, la misma orden indica que, cuando el Ministerio de Industria lo estime oportuno e independientemente del ámbito de aplicación de estas instrucciones, deberán efectuarse estudios complementarios sobre dispersión de contaminantes y sobreelevación de penachos.

Dicha sobreelevación de penacho puede obtenerse, para esta categoría de chimeneas, con suficiente aproximación utilizando la siguiente expresión :

$$\Delta h = D \left(\frac{v_s}{U_s} \right) 1,4$$

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / .55..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.L. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

donde :

Δh : sobreelevación del penacho (m).

D : diámetro de la chimenea en la boca de salida (m).

V_s : velocidad de salida de los gases (m/s).

U_s : velocidad media del viento a la altura de la chimenea (m/s).

En cuanto a la velocidad de salida de los gases, de cuyo valor depende el diámetro de la chimenea, interesa que sea lo más alta posible, compatible con una pérdida de carga razonable. El empleo de velocidades del orden de 14-16 m/s resulta casi siempre adecuado.

Para las otras dos categorías de altura de chimenea, el problema es mucho más complicado, por lo que su estudio se abordará en la fase VII, precisamente por su íntima relación con el mecanismo de difusión.

Una vez calculada la altura física de la chimenea, unas buenas condiciones termodinámicas de los gases efluentes, pueden permitir una sobreelevación del penacho incluso superior a la propia altura física, pudiéndose, - por tanto, duplicar la altura real. Por el contrario, llegar a la chimenea con unos gases en condiciones poco favorables, puede suponer una sobreelevación del penacho de, escasamente, el 20% de la altura física, o incluso inferior.

Como luego se verá al comentar la fase VII, este hecho tiene gran importancia al evaluar los valores de inmisión C_1 .

En la figura 2.6.3., se ha representado, esquemáticamente, una fábrica de abonos NPK a partir de fosfato natural. En ella, figuran tanto las distintas operaciones básicas del proceso productivo, como el sistema de depuración de gases y el reciclo de los gases depurados. Básicamente, existen seis chimeneas propias del proceso en sí (es decir, sin contar las operaciones auxiliares, como calderas, etc.).

Un estudio detallado de las condiciones físico-químicas y termodinámicas de los distintos efluentes, junto con la elección de los depuradores más convenientes en cada caso, bajo una perspectiva integral que abarque las siete fases, permitiría al experto en contaminación, determinar la conveniencia de sustituir dos o más chimeneas por una común. Desde un punto de vista exclusivamente económico o de implantación, esta solución sería excelente, aunque pueda no serlo desde el punto de vista de la difusión posterior de la masa gaseosa resultante de una mezcla heterogénea.

Existe, pues, un amplio espectro de posibilidades de actuación para conseguir aunar la economía con el estricto cumplimiento de la normativa vigente.

DIAGRAMA GENERAL DE UNA FABRICA DE ABONOS NPK
SISTEMA DEPURADOR DE GASES

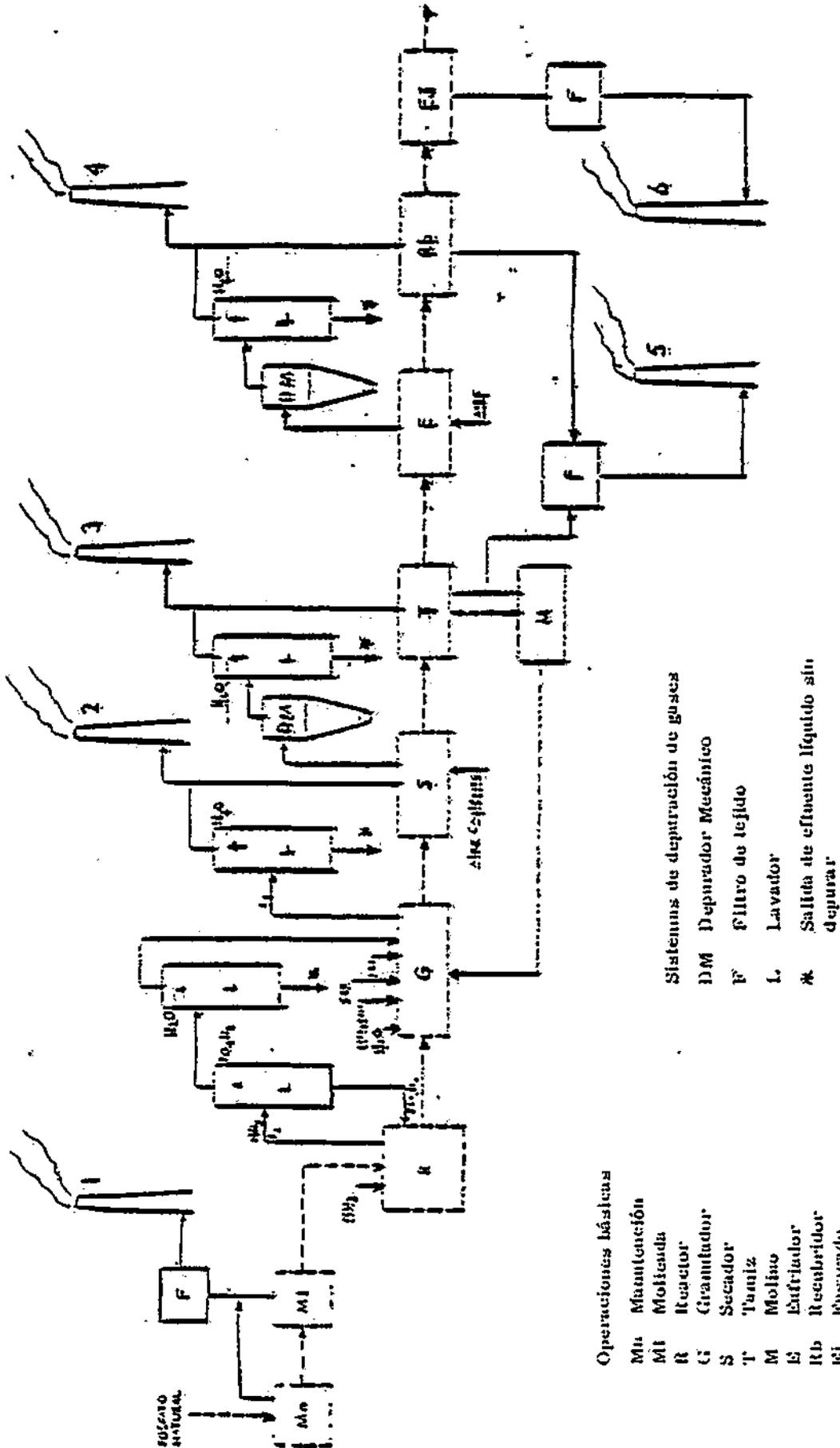


Figura 2.6.3. - Diagrama general de una fábrica de Abonos NPK. Sistema depurador de gases.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./ . 57. .		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Fase VII - Estudios de difusión y concentraciones de inmisión

Se aborda, por último, la etapa que podría denominarse "viento abajo" del foco contaminante. A partir de ahora, no se puede ejercer control alguno sobre la evolución que siga la masa gaseosa emitida por la chimenea. No obstante, en las seis fases anteriores, se ha tenido en cuenta la necesidad de que el impacto ambiental que dicha masa gaseosa produzca, sea mínimo.

La evolución de la concentración de emisión C_e una vez que los gases han abandonado la chimenea, hasta dar lugar a las concentraciones C_i en el entorno de la factoría, puede simularse mediante modelos matemáticos, en los cuales figuran, tanto los valores termodinámicos de los gases efluentes y la cantidad de contaminantes vertidos, como una serie de parámetros meteorológicos que es preciso conocer, puesto que el perfecto conocimiento de la topografía y el microclima de la zona, es condición indispensable para una correcta predicción de efectos futuros.

No obstante, un estudio de difusión exige el análisis de una serie de factores climatológicos y topográficos - mucho más extensa y compleja que los que se introducen numéricamente en el modelo. Por ello, su aplicación en cada caso concreto, admitirá toda una extensa gama de interpretaciones en las que la experiencia, la visión integral del problema y el peso ponderado que se dé a cada factor, influirán decisivamente a la hora de lograr una adecuada aproximación del modelo a la realidad futura.

Al objeto de simplificar, a continuación se describen únicamente los modelos de difusión de penacho gaussiano, en los que se acepta la hipótesis de operar con fuentes puntuales y chimeneas cuyos penachos presentan, en su sección distante transversal, una distribución gaussiana de las concentraciones en sus dos ejes ortogonales (figura 2.6.2.).

Para este tipo de penachos, se han desarrollado diversos modelos, entre los que ha predominado el de Pasquill-Gifford, cuya expresión es :

$$C_i(x, y, z) = \frac{Q}{(1+a)\pi \sigma_y \sigma_z U} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \left[\frac{e^{-\frac{(Z-H)^2}{2\sigma_z^2}}}{e} + \frac{e^{-\frac{(Z+H)^2}{2\sigma_z^2}}}{a e} \right]$$

donde :

- C_i : concentración media (mg/m^3) de inmisión en la cota (x, y, z).
- Q : cantidad total de contaminante vertido (mg/seg).
- σ_y, σ_z : desviaciones standard transversal y vertical del penacho (m), según estabilidades.
- U : velocidad media del viento a la altura física de la chimenea (m/s).
- H : altura efectiva de la chimenea (m).
- x, y, z : distancias, en metros, en un sistema ortogonal de coordenadas centrado al pie de la chimenea.
- a : factor de acomodación, dependiente de cada contaminante y de su acción respecto al suelo. Para a=0 se interpreta que el contaminante en cuestión es totalmente absorbido por el suelo. En el caso de reflexión total, sería a = 1.

El modelo de Pasquill, tal como se ha formulado, es únicamente válido para terrenos llanos, condiciones atmosféricas standard hasta un techo de 300 m. aproximadamente, fuentes puntuales suficientemente separadas

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2/ 58.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

unas de las otras, ausencia de corrientes secundarias e inexistencia de capas de inversión.

Escapa al alcance de la presente comunicación, el estudio de la influencia que, en la difusión de los contaminantes, pueden suponer factores como :

- parámetros atmosféricos.
- circulación atmosférica.
- termodinámica atmosférica: inversiones de temperatura y comportamiento del penacho frente al perfil de temperaturas.
- efectos urbanos.
- efectos topográficos.
- efectos costeros.
- vientos de ladera y efectos de fumigación.

y todas aquellas situaciones que supongan alteración de las premisas para las cuales el modelo de Pasquill tiene aplicación con la formulación que se ha indicado, y que son, precisamente, aquellas en las que suele producirse un aumento importante de los niveles de contaminación.

El valor de las concentraciones a nivel del suelo, es decir, para $z = 0$, y para el caso de absorción total (contaminantes absorbidos por el suelo), se expresa en la forma :

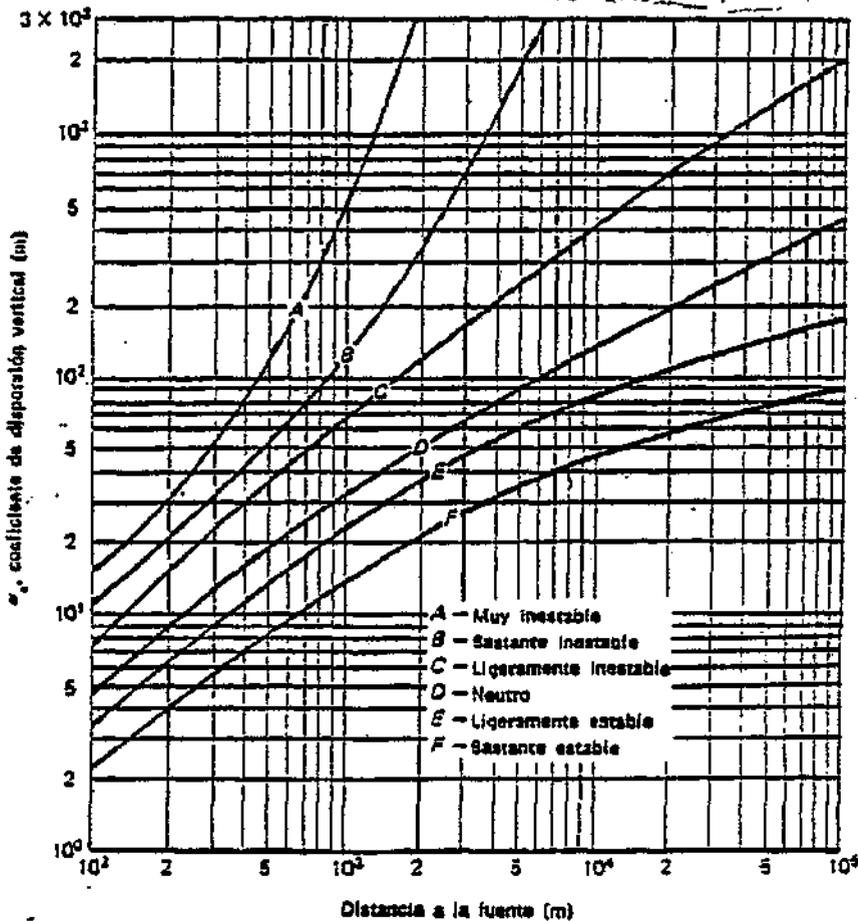
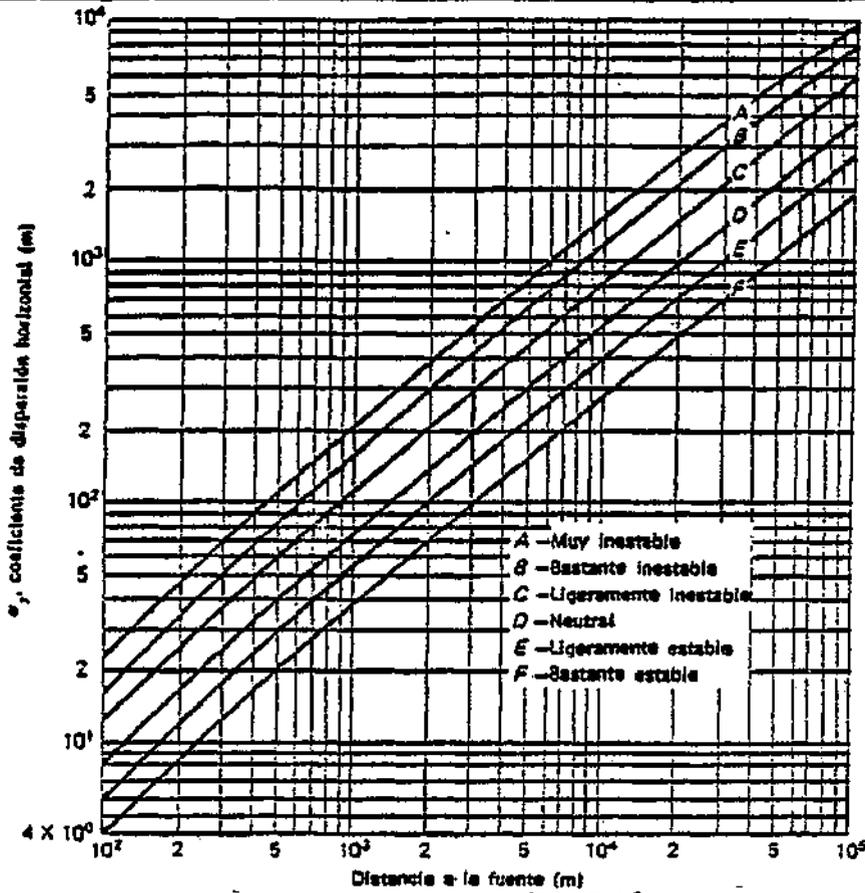
$$C_1(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \cdot e^{-\left(\frac{H^2}{2\sigma_z^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)}$$

expresión dependiente de x e y , ya que, como se indica en la figura 2.6.4., σ_y y σ_z , son función de la distancia al foco en la dirección del viento. Derivando esta expresión respecto a x , y calculando el máximo, se obtiene que la cota x a la cual se produce dicha concentración máxima de inmisión, se produce para :

$$\sigma_z = \frac{H}{\sqrt{2}}, \text{ siendo su valor: } C_1(\text{max.}) = \frac{2 Q}{e \pi U H^2} \cdot \frac{\sigma_z}{\sigma_y}$$

Ya se ha mencionado que el modelo de Pasquill, introduce las desviaciones standard del penacho, en función de la distancia al foco emisor, para distintos tipos de estabilidad vertical.

El modo de determinar la clase de estabilidad atmosférica en función del gradiente vertical de temperatura, que si bien no es el único parámetro del cual depende, sí es el que mayor peso posee, se presenta en la tabla siguiente (pág. 60).



σ_y, σ_z en función de la distancia viento abajo para los tipos de estabilidad de Pasquill-Gifford.

Figura 2.6.4.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2 / . 89..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Clase de estabilidad en el Modelo de Pasquill	Gradiente vertical de temperatura (°C/100m)
A : extremadamente inestable	$\Delta T < -1,9$
B : inestable	$-1,9 < \Delta T \leq -1,7$
C : moderadamente inestable	$-1,7 < \Delta T \leq -1,5$
D : neutra	$-1,5 < \Delta T \leq -0,5$
E : moderadamente estable	$-0,5 < \Delta T \leq -1,5$
F : estable	$1,5 < \Delta T \leq 4,0$
G : extremadamente estable	$\Delta T > 4,0$

La difusión de contaminantes se favorece con la inestabilidad atmosférica, mientras que la estabilidad actúa como una barrera, impidiendo la difusión en sentido vertical. El caso A será, por tanto, el más favorable a la difusión, mientras que el G será el más desfavorable, para igualdad de velocidades de viento.

La concentración máxima se produce en la dirección en que sopla el viento, por lo que a veces el estudio de las concentraciones de inmisión se realiza exclusivamente en dicha dirección, prescindiendo de la componente transversal al mismo ($y = 0$). En este caso la concentración de inmisión a nivel del suelo ($z = 0$) vendrá dada por :

$$C_1(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}}$$

que seguirá siendo máxima para el valor de x que satisfaga la expresión : $\sigma_z = \frac{H}{\sqrt{2}}$, y que conduce al mismo valor del caso anterior.

Recordemos que H es la altura efectiva de chimenea, es decir, la suma de la altura física más la sobreelevación del penacho ($h + \Delta h$).

Según el tipo de estabilidad, el modo de cálculo de Δh varía. Así, para condiciones de estabilidad del tipo E, F, G se puede utilizar :

$$\Delta h = 2,4 \left(\frac{F}{UG} \right)^{1/3}$$

donde :

$$F : \text{flujo térmico, en } m^4/\text{seg}^3. \quad F = g V_s \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{T_b - T_a}{T_a}$$

$$G : \text{parámetro de estabilidad } \left(\frac{g}{T_a} \right) \left(\frac{\Delta T}{\Delta Z} + \frac{0,98}{100} \right) \text{ en } \text{seg}^{-2}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta Z} : \text{gradiente vertical de temperatura (°K/100 m)}.$$

Para condiciones de estabilidad neutras o inestables, la ecuación recomendada para el cálculo de la sobreelevación es :

$$\Delta h = \frac{7,4 h^{2/3} F^{1/3}}{U}$$

siendo h , la altura física de la chimenea.

De la normativa legal vigente se obtiene, para cada contaminante, el valor máximo admisible de inmisión en la zona. Puesto que este valor no puede ser sobrepasado, ha de diseñarse la chimenea de tal forma, que la in

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./.. 61..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

misión máxima por ella producida, más el valor de la contaminación de fondo C_p ya existente en la zona, resulte inferior a dicho valor máximo admisible.

Es preciso conocer, además, para la zona de ubicación de la chimenea, la rosa de los vientos completa, con datos de dirección, magnitud y frecuencia de los vientos en las 16 direcciones meteorológicas, así como el perfil vertical de temperaturas y su frecuencia, a fin de determinar la clase de estabilidad.

De esta forma, cada clase de estabilidad podrá representarse en un cuadro como el que se indica a continuación, extraído de un caso real.

Es preciso poner de manifiesto, sin embargo, que la descripción efectuada hasta el momento debe ser considerada, únicamente, como una primera aproximación a la realidad, ya que en cada caso concreto, sería necesario calcular σ_y y σ_z para las condiciones particulares de la zona, mediante el análisis microclimático correspondiente, evitando, así, sorpresas desagradables.

Las curvas de la figura 2.6.4., por ser universales, pueden conducir a resultados sorprendentes y muy lejanos a la realidad, ya que al haber sido calculadas observando una familia de penachos, sólo son aplicables a penachos del mismo tipo. La utilización de valores de σ_y y σ_z , determinados en un país en casos relativos a otro con clima diferente, es una de las fuentes de error más usuales en el cálculo de niveles de inmisión mediante el uso de estas ecuaciones.

Ya se ha indicado, así mismo, la necesidad de conocer los valores de inmisión ya existentes en el entorno de influencia de la nueva fábrica para cada contaminante considerado -aspecto que exige mediciones de campo relativas a niveles de contaminación y microclima de la zona, que pueden prolongarse hasta períodos de doce meses, a fin de completar un ciclo meteorológico-, puesto que la legislación establece valores de inmisión en dicha zona, los cuales son consecuencia de la contaminación ya existente y de la aportada por la nueva instalación.

Todo ello se complica si, además, existe más de un foco emisor y se desea, como ya se ha indicado, determinar las desviaciones standard reales en la zona objeto de estudio, que serán distintas de las del modelo teórico de Pasquill-Gifford, o si se trata de calibrar un modelo para una chimenea ya existente y, en relación con la cual, se desea determinar la contribución de su emisión de contaminantes a la contaminación total de una cierta zona.

Además, el proceso y manejo de los datos suele ser bastante complicado, puesto que ha de considerarse la componente ortogonal a la dirección del viento. Así, por ejemplo, en una cierta zona en dirección Norte, la concentración de inmisión puede ser mayor cuando el viento sopla en dirección NNE, que cuando sopla en dirección N, si la velocidad media del viento en la dirección NNE es mucho menor que en dirección Norte. Y la utilización de datos exige una homogeneización de los mismos, de forma que las mediciones efectuadas se refieran a muestras relativas a períodos de tiempo similares (una hora, dos horas, etc.), realizando para ello, si es preciso, las correspondientes transformaciones.

Todo ello obliga a la utilización de modelos más o menos complicados, según topografía del terreno y a su alimentación en base a información detallada de la zona objeto de estudio. Puede destacarse la necesidad de realizar un estudio microclimático que ponga de manifiesto no sólo las condiciones de estabilidad, y su frecuencia, de la zona, sino también, y fundamentalmente, las situaciones más críticas en relación con la futura difusión de contaminantes.

TABLA 2.6.1.

PORCIENTO DE OCURRENCIA DE VELOCIDAD DEL VIENTO EN TODAS DIRECCIONES. ESTABILIDAD CLASE B (4,07% del tiempo)

Dirección del viento	Velocidad del viento m/s					TOTAL
	0-0,5	0,6-2	2,1-4	4,1-6,5	> 6,6	
N		0,03	0,12	0,15		0,30
NNE	0,03	0,19	0,18			0,40
NNE	0,03	0,37	0,25	0,09		0,74
NNE		0,06	0,03			0,09
E			0,15			0,15
ESE						
SE		0,06	0,22			0,28
SSE			0,06			0,06
S		0,03	0,03	0,03	0,03	0,12
SSO		0,10		0,19		0,29
SO		0,06	0,15	0,31		0,52
OSO			0,06	0,21		0,27
O			0,10	0,19		0,29
ONO						
NO			0,06	0,09	0,03	0,18
NNO			0,03	0,31	0,04	0,38
TOTAL	0,06	0,90	1,19	1,57	0,10	4,07

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./ . 63 .		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	6	CAPITULO : PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

El problema no es, por tanto, sencillo y no puede ser resuelto en forma adecuada sin una notable dedicación de esfuerzos. Y, desde luego, es preciso que sea enfocado de una forma global, puesto que una actuación correcta previa a la salida de gases por la chimenea, es imprescindible para asegurar una buena difusión de dichos gases.

Como ejemplo de lo dicho, a continuación se efectúa un breve análisis de aplicación del modelo gaussiano de Pasquill a un caso particular de difusión de partículas sólidas, cuya difusión se expresa por la fórmula :

$$C_i(x, 0, 0) = \frac{v_t Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} e^{-\frac{1}{2} \frac{(H - \frac{x v_t}{U})^2}{\sigma_z^2}}$$

APLICACION DEL MODELO A UN CASO PARTICULAR

A la hora de resolver un problema de contaminación atmosférica, se plantea la alternativa de elegir entre los distintos tipos de depuradores que satisfagan el cumplimiento de los valores máximos de emisión C_e . Sin embargo, como se verá, las concentraciones de inmisión no son sólo función de la concentración de emisión, para unas condiciones climatológicas dadas.

Supóngase que por una chimenea de 70 m. de altura y 4 m. de diámetro en su boca de salida, se emite un gas efluente, ya depurado, conteniendo las partículas de polvo residual. Dicha depuración, hasta los niveles máximos admisibles de C_e o inferiores, ha podido ser efectuada por procedimientos de vía seca o por sistemas de vía húmeda.

Ambas alternativas van a ser comparadas, puesto que las condiciones de difusión, fuera de la chimenea, del gas efluente, son muy distintas en cada caso, pudiendo ocurrir que un gas efluente de concentración en polvo inferior a otro, no signifique una inmisión inferior en la zona de influencia de la factoría, o en parte de ella.

En el caso considerado, el gas a depurar es el efluente de un horno secador. Su concentración inicial en partículas es de 5 gr/m^3 , con un 30% de peso de partículas inferiores a 10μ .

En la primera alternativa, se utiliza un electrofiltro trabajando con un rendimiento del 97%. La emisión residual presenta una concentración de partículas de 150 mg/Nm^3 , un diámetro medio de partículas de 4μ y una temperatura de 150°C en los gases efluentes.

En la segunda alternativa, vía húmeda, se utiliza un venturi de baja pérdida de carga (130 m.m. de c.d.a) con un 99% de rendimiento. La emisión residual tiene 50 mg/Nm^3 de partículas, un diámetro medio de partículas de 2μ y una temperatura de 30°C en los gases efluentes.

El caudal final de gases resulta similar en ambos casos, debido a que la diferencia de temperatura compensa el caudal del vapor de agua aportado en la alternativa de vía húmeda; así, pues, en ambos casos se considerará la misma velocidad de salida para el gas efluente.

Si se supone una velocidad del viento de 5 m/s, se podrá calcular la concentración de inmisión en cada caso en una cota situada x metros viento abajo del pie de la chimenea.

DATOS GENERALES	CASO 1 : Vía seca	CASO 2 : Vía húmeda
h = 70 m.	C _e = 150 mg/Nm ³	C _e = 50 mg/Nm ³
D = 4 m.	t = 150 °C	t = 30 °C
U = 5 m/s	φ _m = 4	φ _m = 2
V _s = 14 m/s	V _t = 10 ⁻³ m/s	V _t = 2.10 ⁻⁴ m/s
t _a = 20 °C		

Las velocidades de sedimentación V_t , han sido obtenidas en función del número de Reynolds y del coeficiente de arrastre de la partícula, ambos dependientes de las características de las partículas y del medio difusor, resultando que:

$$(V_t)_1 = 5 (V_t)_2$$

Se ha supuesto un gradiente vertical de temperaturas único en la zona, de valor $\frac{\Delta T}{\Delta Z} = -1,52 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ m}$. Es decir, en el límite inferior de la estabilidad clase C de Pasquill.

De los datos de partida se deduce que $Q_1 = 3 Q_2$ y que los flujos térmicos son los siguientes: $F_1 = 169 \text{ m}^4/\text{seg}^3$ y $F_2 = 17 \text{ m}^4/\text{seg}^3$.

La sobreelevación del penacho para la clase C de estabilidad, puede obtenerse por la fórmula de Briggs:

$$\Delta h = \frac{7,4 h^{2/3} F^{0,33}}{U}$$

Resultando $\Delta h_1 = 139 \text{ m}$. y $\Delta h_2 = 65 \text{ m}$., con lo que se obtienen unas alturas efectivas respectivas de 209 m. y 135 m.

Si ahora se determina la relación de concentraciones R en un mismo punto, es decir, $\frac{(C_1)_1}{(C_1)_2}$ y se sustituyen los valores que se han ido obteniendo, resulta:

$$R = 15 e^{-\frac{4}{2 \sigma_z} (1,92 \cdot 10^{-8} x^2 - 1,46 \cdot 10^{-2} x + 25,515)}$$

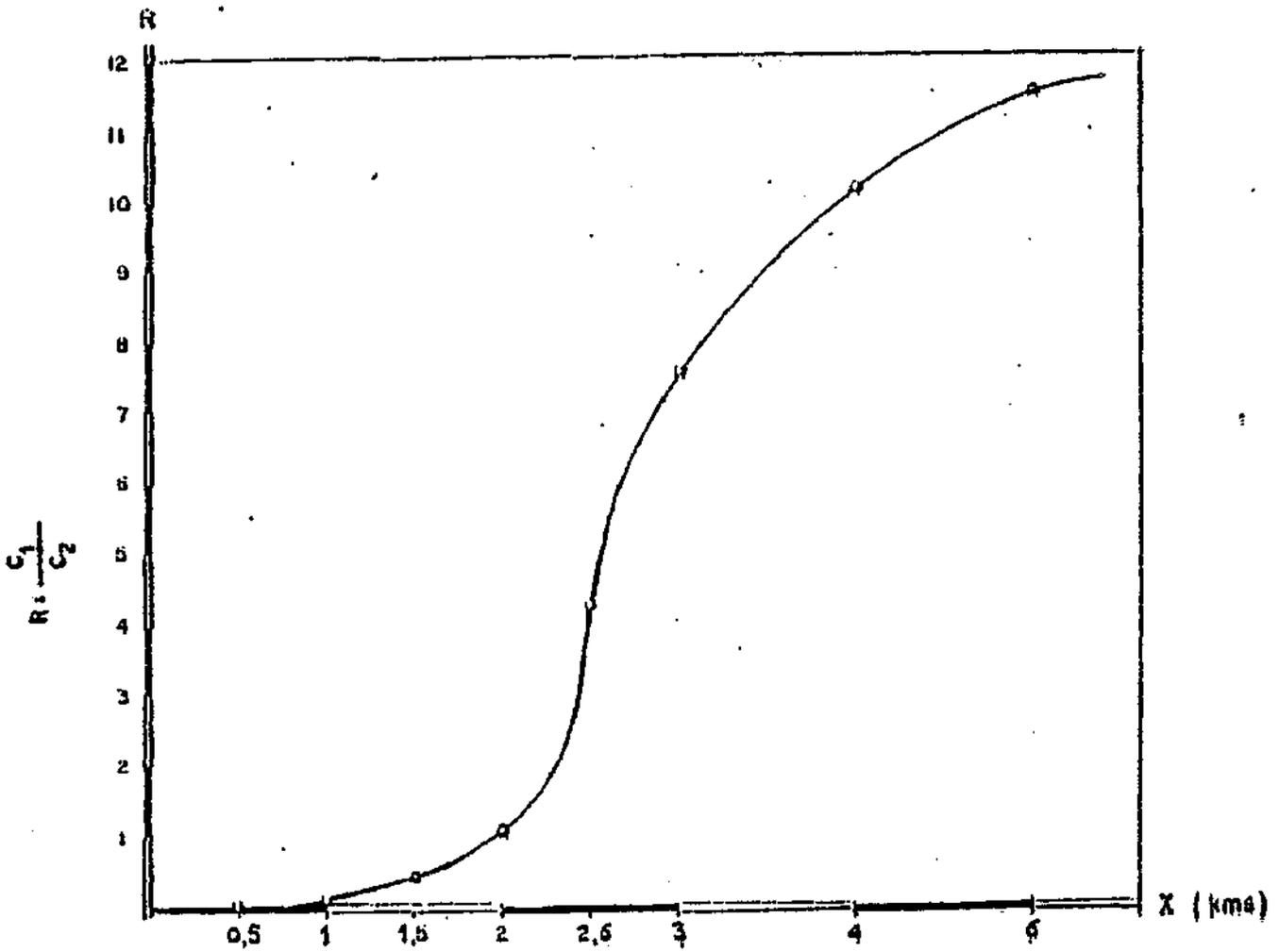
que, representada gráficamente, presenta la forma de la figura 2.6.5., obtenida a partir de dicha función R y teniendo en cuenta que σ_z también es función de x (figura 2.6.4.).

Puede observarse que para valores de $x \leq 2000$, el valor $R \leq 1$, mientras que para valores de $x > 2000$, la relación $R > 1$.

Ello indica que hasta 2 km. de la chimenea, la inmisión producida por el foco emisor, es menor en el caso de depuración por vía seca -aún cuando la concentración de emisión C_e es tres veces mayor- debido a las mejores condiciones de difusión de los gases efluentes.

Este sencillo ejemplo, pone de manifiesto la importancia del tipo de depurador elegido a la hora de poder evaluar las concentraciones de inmisión en un cierto entorno, y que un mayor escape residual, no origina necesari-

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./..65..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA	01	10	80



DISTANCIA VIENTO ABAJO DE LA CHIMENEA

Figura. - 2.5.3.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / . 66.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

riamente una mayor contaminación ambiental en un cierto entorno para unas condiciones climatológicas determinadas. No cabe duda, sin embargo, de que todo el polvo emitido por la chimenea ha de depositarse en algún sitio, aunque sea fuera del entorno objeto de estudio, por lo que no debería limitarse el problema a considerar únicamente las concentraciones producidas, debiéndose analizar también las tns. absolutas de contaminante emitido en uno y otro caso.

En un caso real, sería preciso realizar un estudio similar para cada clase de estabilidad, frecuencias y diversas alturas físicas de chimenea en cada alternativa de depuración existente. Para cada una de ellas, cumpliendo todas ellas los valores de emisión C_e establecidos por la legislación, se determinarían los costes totales (amortización de la inversión y costes de operación propiamente dichos), de todo el sistema, incluida la inversión necesaria para distintas alturas de chimeneas, recomendándose la solución más aconsejable desde el punto de vista técnico-económico.

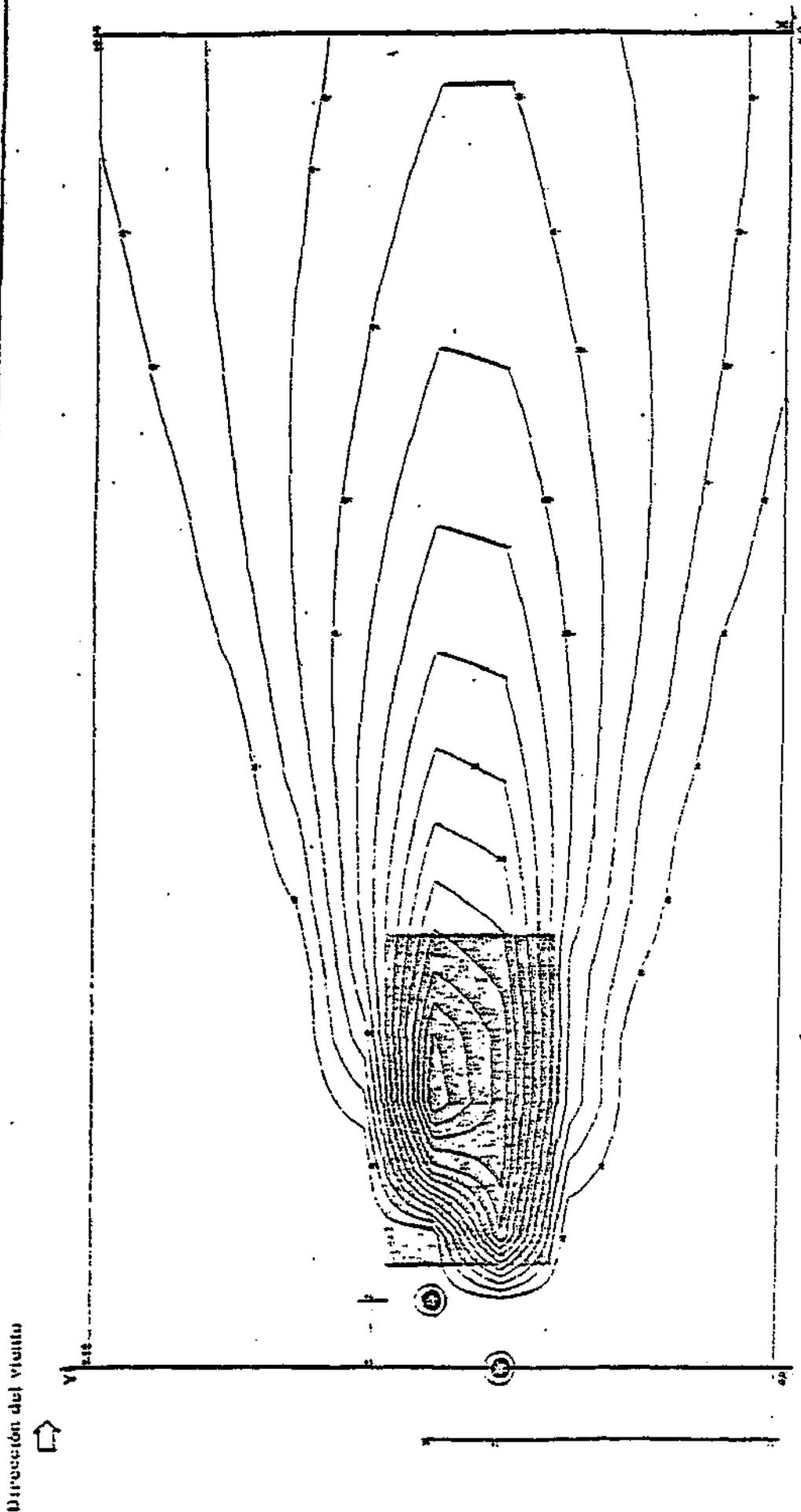
Para chimeneas de gran altura, superiores a 300 m., así como cuando la orografía de la zona resulta extremadamente accidentada, puede ser muy conveniente analizar las condiciones de difusión mediante ensayos con modelos reducidos en un túnel de viento.

El cálculo adimensional, permite representar a escala reducida, generalmente 1 : 2500, todas las variables tanto topográficas como climáticas, que condicionan la difusión.

Los resultados obtenidos con este procedimiento, han logrado aproximaciones a la realidad muy superiores a los estudios mediante modelos matemáticos, por lo que siempre que sea posible, es recomendable esta tercera alternativa.

Influencia de la localización de las chimeneas en los niveles de inmisión

Se presentan a continuación las curvas de igual concentración (isopletras) de dos chimeneas de igual altura, - 180 m., por cada una de las cuales se emiten 150 Tn/día de anhídrido sulfuroso. La velocidad de salida de los gases es de 16 m/seg., el diámetro de la chimenea de 6 m., y la temperatura de los gases, del orden de 400°K. La velocidad del viento es de 7 km/h. y la estabilidad corresponde a la clase 2, de acuerdo con la clasificación de Pasquill.

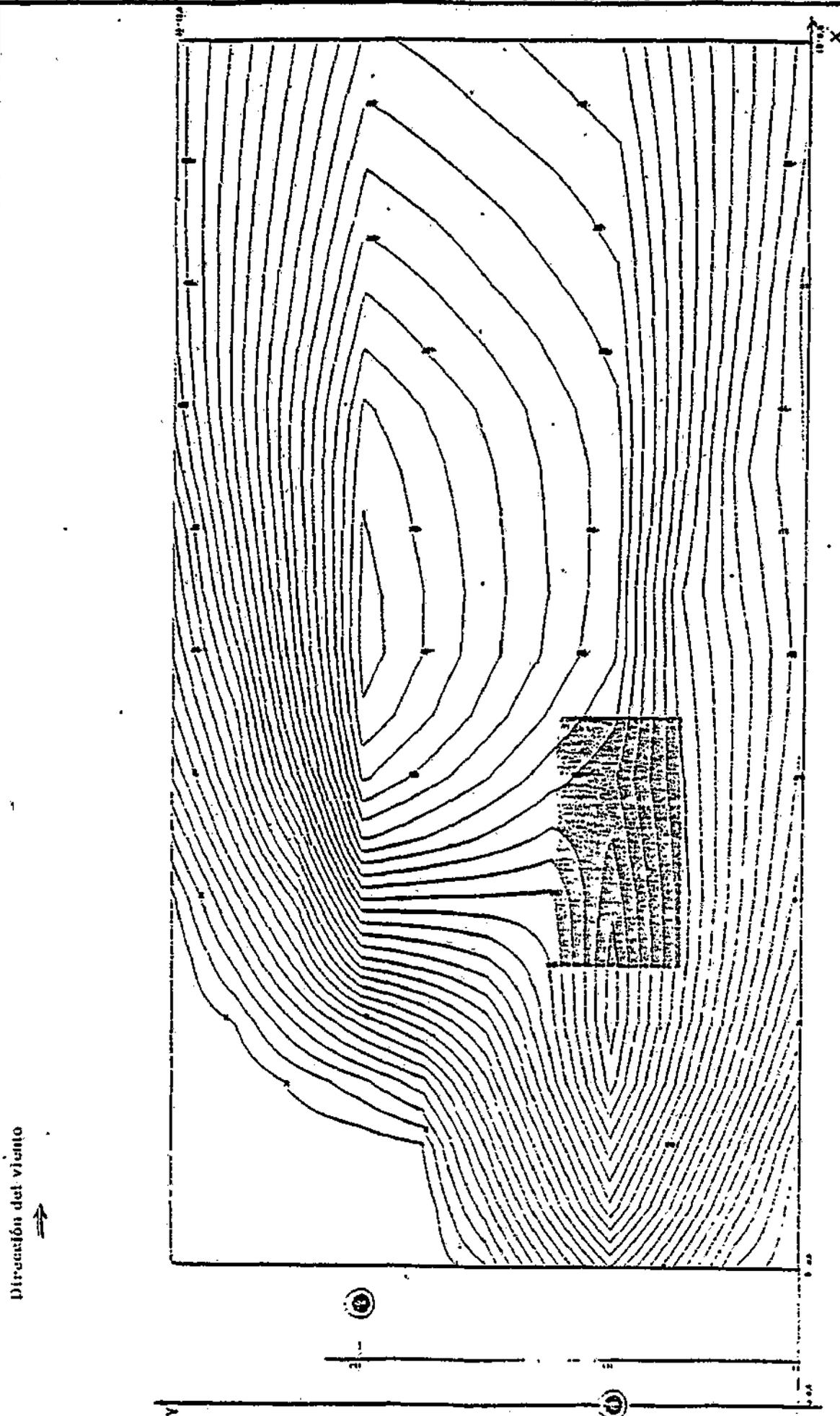


ISOPLETAS

Caso de dos chimeneas de 180 mts.
Emisión, 150 t/día de SO₂ por chimenea.
Velocidad viento 7 km/hora
Estabilidad clase 2 Pasquill

Chimeneas no alineadas
en la dirección del viento

Figura. - 2.6.6.



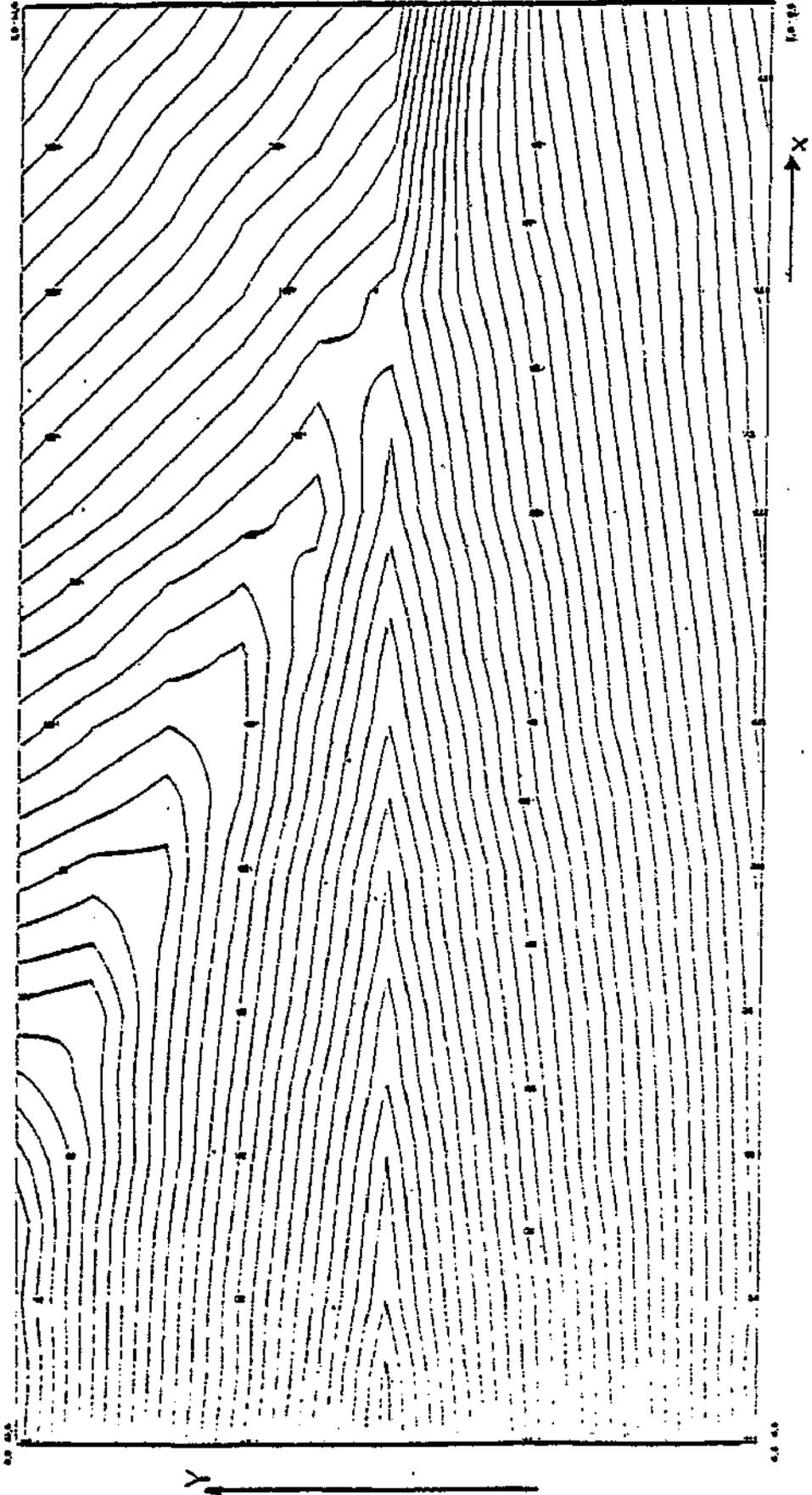
ISOPLEHTAS

Caso de dos chimeneas de 180 mts.
Emisión, 150 m/día de SO₂ por chimenea,
Velocidad viento 7 km/hora
Estabilidad clase 2 Pasquill

Chimeneas no alineadas
en la dirección del viento

Figura. - 2.6.7.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./69...		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	6	CAPITULO: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RESOLUCION DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACION ATMOSFERICA	01	10	80



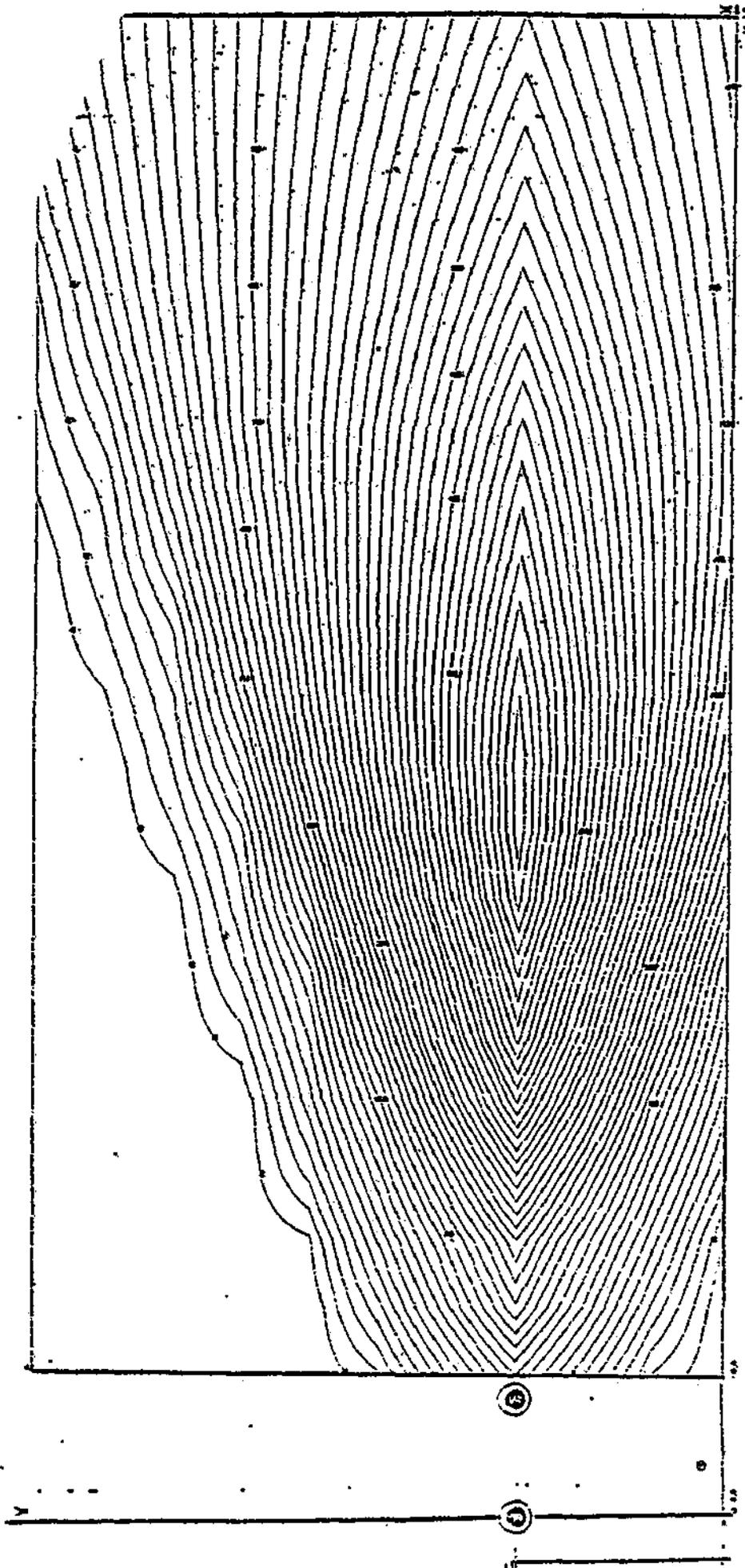
ISOPLETHAS

Caso de dos chimeneas de 180 mts.
 Emisión, 150 tn/día de SO₂ por chimenea.
 Velocidad viento 7 km/hora
 Estabilidad clase 2 Pasquill

Chimeneas no alineadas
 en la dirección del viento

Figura - 2.6.8.

↑
Dirección del viento



ISOPLETHAS

Caso de dos chimeneas de 100 mts.
Emisión, 150 tn/día de SO₂ por chimenea
Velocidad viento 7 km/hora
Estabilidad clase 2 Pasquill

Chimeneas alineadas
en la dirección del viento

Figura. - 2.6.9.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./71.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	7	CAPITULO: TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

7.1. FASES DE LA DETERMINACION DE NIVELES DE CONTAMINACION

La determinación de concentraciones de contaminantes atmosféricos, afecta a dos campos principalmente: Emisión (fuentes estacionarias o móviles) e Inmisión (ambiente).

En el caso más general, la determinación de niveles de contaminación, comprende las siguientes etapas:

- Toma de muestras
- Acondicionamiento de las mismas
- Análisis

En el desarrollo del presente trabajo, se han utilizado las siguientes definiciones:

- Toma de muestras. Separación de una porción representativa del gas objeto de estudio. En el caso de análisis de Laboratorio, la toma de muestra incluye también la separación del contaminante del seno del gas segregado, normalmente mediante retención en un absorbente en fase líquida.
- Acondicionamiento. Adecuación del caudal de gas aspirado a las condiciones de funcionamiento de los monitores automáticos o de su absorción mediante borboteadores.
- Análisis. Evaluación cuantitativa del contaminante objeto de estudio. Puede realizarse a posteriori, en un laboratorio o en campo, de forma automática mediante monitores.

Toma de muestras

Es la etapa quizás más importante y, en algunos casos (isocinéticos), cobra capital importancia. El posterior tratamiento que se da a la muestra tomada, no tendrá valor alguno si aquella no es representativa del gas que se pretende analizar.

Por lo general, el análisis se realiza extrayendo una muestra representativa de dicho gas, en cuyo caso se denomina extractivo. Si, por el contrario, dicho análisis se realiza sobre el gas sin necesidad de segregar una porción de él, se denomina "in situ". Un ejemplo evidente de determinación "in situ" es la medida de la temperatura.

La toma de muestra se realiza, generalmente, de forma continua, tanto si el análisis posterior se lleva a cabo de forma automática o manualmente en el Laboratorio. En el primer caso, el análisis se realiza en tiempo real, obteniéndose valores instantáneos. Cuando se realiza en Laboratorio, al que ha de llevarse la muestra recogida, el valor obtenido corresponde a la media de las concentraciones en el tiempo de toma de muestra.

De la buena selección del punto de toma de muestra y emplazamiento físico del reparto, dependerá, obviamente, la obtención de una muestra representativa.

En esta etapa se incluye el transporte de la muestra hasta las dos siguientes etapas. Dicho transporte, será continuo o discontinuo, según el análisis se realice de forma automática o manual y durante el mismo, la

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./72..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.L. MINER	7	CAPITULO: TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

muestra deberá conservar intactas sus propiedades, a fin de no desvirtuar el análisis.

Acondicionamiento

El análisis automático y la absorción previa al análisis manual, para poder realizarse con precisión, requiere una muestra con unas determinadas características (temperatura, ausencia de partículas en suspensión, humedad, ausencia de otros contaminantes que puedan interferir, etc.). El acondicionamiento es, pues, otra etapa importante previa al análisis.

Análisis

Es la etapa que más versatilidad ofrece, ya que para cada determinación, existe un sistema alternativo de soluciones válidas cuya elección depende, en la mayor parte de los casos, de las disponibilidades económicas.

Las técnicas de análisis, se pueden dividir en dos grandes grupos, según se realice:

- En Laboratorio :
- Gravimetría
 - Valorimetría
 - Culombometría
 - Colorimetría
 - Espectroscopía
- Automáticamente :
- Infrarrojo no dispersivo
 - Quimioluminiscencia
 - Ionización llama
 - Cromatográficas

Los métodos de análisis suelen ser comunes, tanto para Emisión como para Inmisión, ya que normalmente sólo varía el rango de medida y el acondicionamiento de la muestra. El mismo monitor automático, excepto en el caso de polvo, puede utilizarse para emisión e inmisión, a condición de diluir la toma extraída en un gas inerte.

- Toma y acondicionamiento de la muestra

Por la íntima relación que liga a estas dos etapas, se comentarán conjuntamente, prescindiendo de si el sistema de análisis es automático o de laboratorio.

La toma de muestras incluye la selección del punto de medida, de cuya elección depende, como ya se indicó, la representatividad de la muestra.

Emisión. Según se trate de evaluar contaminantes gaseosos o polvo, la selección del punto de toma de muestra en una chimenea o conducto, variará sustancialmente. En el caso de contaminantes gaseosos, se buscará preferentemente un punto donde la mezcla de gases sea lo más homogénea posible. La existencia de turbulencia, coadyuva a la obtención de muestras representativas. Por el contrario, si lo que se pretende analizar es polvo, el posterior análisis es más simple y más representativo, si la localización del punto de toma de muestra se realiza en puntos cuyo régimen sea laminar.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./73..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	7	CAPITULO: TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Prescindiendo del análisis de polvo en forma continua, por radiaciones β , que se realiza "in situ" y por lo tanto no puede hablarse de toma de muestra, una vez localizado el punto de muestreo, se procederá a la extracción de una cantidad de gas en forma continua. Ahora, al igual que al estudiar la localización del punto de toma de muestra, el proceso que siga el caudal segregado, dependerá del tipo de contaminante a analizar.

. Contaminantes gaseosos. - Mediante tuberías termoeléctricas, a fin de evitar condensaciones, la muestra se transporta desde el punto de toma de muestra a un tren de acondicionamiento donde sufre las siguientes operaciones :

- filtración y eliminación de partículas sólidas
- enfriamiento
- eliminación de condensados y humedad

pasando a continuación, según se trate de análisis automático o manual, a un monitor automático o a un tren de absorción, tal como se comentarán en el epígrafe Equipos de toma de muestra.

. Polvo. - El muestreo de polvo en emisión, se realiza de forma discontinua y en condiciones de isocinetismo. En este caso no existe el transporte del gas, ya que la sonda se introduce directamente en la chimenea.

Inmisión. Más que de localización del punto de toma de muestra, ahora se debe de hablar de ubicación de los aparatos de medida. Se deberán de buscar emplazamientos que reflejen las condiciones reales del aire ambiente de la zona.

El acondicionamiento de la muestra, al ser la temperatura ambiente, queda reducido a la eliminación del polvo en suspensión y, eventualmente, de la humedad. Un simple filtro integral resuelve el primer problema.

Una vez acondicionada la muestra, al igual que para emisión, pasa bien a un monitor o a un tren de absorción.

Cuando lo que se pretende analizar es polvo, ha de hacerse distinción según se trate de polvo en suspensión o sedimentable. En ambos casos, no existe acondicionamiento previo y los procedimientos de toma de muestra forman parte integrante del propio análisis, por lo que se comentarán en dicho apartado.

- Equipos de toma de muestra

A continuación, se comentan brevemente los equipos empleados en el epígrafe anterior.

Emisión. La sonda isocnética, empleada para la toma y captación de polvo en emisión, consta de las siguientes partes :

- medidor de velocidad en el conducto
- medidor de velocidad en la sonda
- mecanismo de regulación de la velocidad en la sonda
- filtro de retención de polvo
- sistema de acondicionamiento
- tren de absorción (4 borboteadores) eliminable mediante by-pass
- contador del gas aspirado
- bomba de aspiración

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./74..		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	7	CAPITULO: TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Así pues, si los gases no están extremadamente calientes, el propio acondicionamiento de gases de la sonda puede permitir absorber, en los cuatro borboteadores de que dispone, cualquier contaminante gaseoso, una vez que ha sido retenido el polvo en el filtro. Bajo ciertas condiciones, puede determinarse a la vez polvo y uno o dos contaminantes gaseosos.

El tren de absorción simple, empleado para tomar y acondicionar los gases en los que se pretende analizar - manualmente, en el Laboratorio, contaminantes gaseosos, consta de :

- filtro de fibré en la boca de toma
- tubería termoeléctrica
- refrigerador
- eliminador de humedad y condensados
- borboteadores (4 o más)
- contador de gas
- bomba de aspiración

Cuando el análisis se realiza automáticamente, el tren de absorción se elimina y se sustituye por un monitor de los que se comentan en el epígrafe correspondiente.

Inmisión. El equipo de toma de muestras es básicamente un tren de absorción simplificado, ya que el acondicionamiento de la muestra se limita a eliminar el polvo. El tren de absorción propiamente dicho, está constituido normalmente por uno o dos borboteadores, ya que para los niveles de concentración de inmisión, dos borboteadores son suficientes para absorber totalmente cualquier contaminante gaseoso.

En lo que respecta a la toma de polvo, si se trata de análisis automático, tanto la toma como el acondicionamiento se realiza mediante monitores. También en los sistemas de Laboratorio, el propio aparato toma la muestra y retiene el polvo, no existiendo por tanto la etapa de acondicionamiento.

Cuando la toma de muestras se realiza de forma manual, una vez absorbido el contaminante en la disolución adecuada, mediante el empleo de borboteadores, la muestra recogida es transportada en frascos adecuados al laboratorio, donde se procede al análisis cuantitativo de las mismas.

A continuación, se presenta en forma de cuadro, una relación del equipo de toma y acondicionamiento que permite tomar muestras para su posterior análisis manual en Laboratorio de cualquier contaminante, tanto en emisión como en inmisión.

- Análisis:

En las tablas siguientes se hace una referencia a los distintos sistemas y técnicas de análisis para los contaminantes más característicos, así como observaciones sobre el modo de realizar los análisis de las muestras recogidas en el Laboratorio, reservando el comentario de los análisis automáticos al siguiente epígrafe. Tal como ya se indicó, las técnicas de análisis empleadas en laboratorio, siempre sobre muestras en fase líquida, se reducen prácticamente a las siguientes : gravimetría, valorimetría, culombometría, colorimetría y espectroscopía.

CONTAMINANTE	SISTEMA DE ANALISIS	TECNICA DE ANALISIS	OBSERVACIONES
PM ₁₀	LABORATORIO	ESPECTROFOTOMETRIA GRAVIOMETRIA	Aparador de grandes volúmenes y filtro de retención
	AUTOMATICO	Detección de radiación β Detección fotométrica	Aparador de grandes volúmenes y filtro de retención
PM _{2.5}	LABORATORIO	GRAVIOMETRIA	Celda provista de emisor y receptor de partículas β o luminosa
	LABORATORIO	GRAVIOMETRIA	Colector de polvo sedimentable. Cada mes se analiza el polvo recogido. Se determina en laboratorio la cantidad de polvo y su composición
PM ₁₀	LABORATORIO	GRAVIOMETRIA	Toma de muestra mediante sonda fotoacústica. El polvo queda retenido en un filtro y por pesada se determina la cantidad de polvo
	AUTOMATICO	Detección de radiación β Detección fotométrica	En la chimenea se instalan un emisor y un receptor de partículas β. Por el intervalo entre las emisiones y las que llegan al receptor se evalúa la concentración de polvo.
CO ₂	LABORATORIO	COLORIMETRICO	Se absorbe la muestra sobre tetraclorometano ácido. Se añade en el laboratorio una mezcla de Cl ₂ , cloruro de persulfato y formaldehído. El color rojo violáceo resultante se mide empleando un espectrofotómetro
	LABORATORIO	VALORIMETRICO	Se absorbe en H ₂ O ₂ y el SO ₂ resultante se valora con NaOH
SO ₂	AUTOMATICO	COLORIMETRICO	Se absorbe en disolución acuosa de H ₂ K ₂ Cr ₂ O ₇ y SO ₂ . Tiene lugar la reacción: $SO_2 + H_2O + 2H^+ + 2Cr_2O_7^{2-} + 2H_2O \rightarrow 2HSO_3^- + 4H^+ + 2Cr^{3+}$. Tiene lugar la reacción: $Cr^{3+} + H_2O \rightarrow Cr(OH)^+ + H^+$ dando una corriente proporcional a (SO ₂)
	AUTOMATICO	Infrarrojo no dispersivo	Monitor automático (no consume gases de reacción)
O ₃	AUTOMATICO	Fotometria	Monitor automático (consume H ₂ puro)

CONTAMINANTE	SISTEMA DE ANALISIS	TECNICA DE ANALISIS	CONSERVACIONES
CO	LABORATORIO AUTOMATICO	COLORIMETRIA COLORIMETRIA FOTOMETRIA	Se hace pasar lentamente un gran volumen de muestra a 160°C sobre 12 g. de P_2O_5 liberando su valor a SO_2 (H ₂) o de manera colorimétrica. Papelca humedecida en cloruro de paladio que se exponen a la muestra. Se dispone papallo metálico que deja mancha. Se compara con pátromen Monitor automático (no precisa gases de referencia).
NO _x	LABORATORIO AUTOMATICO	COLORIMETRIA QUINELUMINISCENCIA	Se mide la coloración resultante de tratar el NO_2 con ácido sulfúrico y dióxido de nitrógeno en medio ácido. Se mide la coloración resultante a 660 nm. haciendo referencia a una curva patrón Monitor automático (consumo O_2 o aire purificado)
H ₂ S	LABORATORIO AUTOMATICO	COLORIMETRIA	Según el tipo de hidrocarburo varía el procedimiento pero la técnica es absorción sobre reactivo, tratamiento específico y medida de la coloración producida Monitor automático (consumo H_2)
O ₃	LABORATORIO AUTOMATICO	CROMATOGRAFIA. DETECTOR DE IONIZACION FLAMA COLORIMETRIA	Se absorbe la muestra en I_2 . Para disolución se oxida con $H_2 O_2$ para eliminar el SO_2 y se ajusta el pH para eliminar la interferencia de los NO_x . El ioduro se oxida a I_2 por la acción de O_3 . Se libera I_2 que se mide espectrofotométricamente a 352 nm Monitor automático (consumo $C_2 H_4$)
SH ₂	LABORATORIO AUTOMATICO	COLORIMETRICO VALORIMETRIA DETECCION FOTOMETRICA	Se absorbe en medio ácido conteniendo paraformaldehído y cloruro férrico. Se mide el color azul resultante Se absorbe en una sol de Cd. y el producto formado se valora iodométricamente Monitor automático (consumo H_2)

CONTAMINANTE	SISTEMA DE ANALISIS	TECNICA DE ANALISIS	OBSERVACIONES
H ₂	LABORATORIO	COLORIMETRIA	Se absorbe la muestra sobre agua destilada, acidulada con 30% H ₂ PO ₄ se añade reactivo Nessler y se efectúa la lectura colorimétrica a 440 nm. Selecciona el valor hallado a una curva patrón determinada previamente.
Cl ₂	LABORATORIO	COLORIMETRIA	Se absorbe la muestra sobre agua, H ₂ OII o sobre ortotoluidina. En los dos primeros casos se añade luego la O. Toluidina y aparece color amarillo que se mide.
		ELECTRODO ESPECIFICO	Se recoge sobre agua y se mide la conductividad con un electrodo específico.
H ₂	LABORATORIO	VALORIMETRIA	Se recoge sobre H ₂ OII y se valora con H ₂ OII.
		ELECTRODO ESPECIFICO	Se recoge sobre agua y se mide la conductividad con un electrodo específico.
Metales	LABORATORIO	ESPECTROSCOPIA DE ABSORCION ATOMICA	Dependiendo de cada metal se recoge la muestra y se analiza en laboratorio.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 78		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

- Determinación de caudales

A modo de síntesis, recordaremos que la velocidad de los gases en un conducto, viene expresada por la ecuación :

$$V = c \sqrt{2g \frac{\Delta P}{\rho}}$$

donde :

V : es la velocidad de los gases expresada en m/s

g : es la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s²

ΔP : es la presión dinámica medida mediante el tubo de pitot y expresada en mm CdA, es decir, en kg/m² aproximadamente.

ρ : es la densidad de los gases en kg/m³

c : es un coeficiente propio de cada tubo de pitot, que para el caso del tubo de pitot standard, vale prácticamente la unidad.

Para determinar la densidad es suficiente, en la mayoría de los casos, con determinar la temperatura seca T_s y la temperatura húmeda T_h de los gases.

Para ello, es preciso el siguiente equipo, dependiendo de la temperatura de salida de los gases.

Temperaturas bajas (hasta 120°C)

- Termómetro de mercurio.

Con él se pueden medir ambas temperaturas, utilizando una gasa empapada en agua y aplicada sobre el bulbo en la determinación de la temperatura húmeda.

Temperaturas altas

- Termopar o termómetro para la medida de T_s.

- Tren de absorción provisto de contador de gas.

Determinando la cantidad de vapor de agua presente en los gases, mediante enfriamiento de los gases y absorción en borboteadores o sílica-gel, se elimina el agua presente en forma de vapor. Conocido el caudal seco, se puede evaluar el % de vapor presente en los gases.

Una vez conocidas T_s y T_h, se puede calcular el % de vapor de agua en volumen presente en los gases, mediante un diagrama psicométrico.

La determinación de la humedad en los gases es una cuestión, como se verá a continuación, de la máxima importancia.

Recordemos que la densidad del aire en condiciones normales es de 1,29 kg/Nm³ y que a t°C valdría :

$$\rho = 1,29 \frac{273}{273 + t}$$

Aún en gases con mucho polvo (ej. 10 gr/Nm³) se puede tomar como densidad de los gases, la densidad del aire a esa temperatura, ya que los 10 gr. son despreciables frente a los mil y pico que pesa un metro cúbico de aire.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 79		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Otro tanto podría decirse de los contaminantes gaseosos (SO_2 , NO_x , mercaptanos, etc.) ya que, en conjunto, no suelen pasar de 10 gr. por metro cúbico.

No obstante, para procesos de combustión, es necesario considerar el CO y CO_2 , ya que su concentración resulta muy elevada (medida mediante analizador ORSAT). No ocurre lo mismo cuando existe vapor de agua, cuya densidad en condiciones normales es :

$$\rho_{H_2O} = 0,80 \text{ kg/Nm}^3$$

pudiendo alcanzar hasta más de un 40% del volumen de gases emitido a la atmósfera.

Si un gas presenta un X% en volumen de vapor de agua, la densidad que tomaríamos como base de cálculo sería en condiciones normales :

$$\rho = \frac{X \cdot 0,80 + (100-X) 1,29}{100} = 1,29 - 0,0049X$$

Así, por ejemplo con un 30% de humedad, un gas tendría una densidad de $1,29 - 30 \cdot 0,0049 = 1,143 \text{ kg/Nm}^3$.

Visto ya como puede calcularse la densidad, se presenta a continuación un ejemplo concreto :

En un conducto de 1,60 m. de diámetro, se ha determinado que la temperatura seca es de 80°C y la humedad del 10%. La presión dinámica medida es de 20 mm. C.d.A.

Se desea calcular el caudal de gases que pasa por el conducto.

El caudal vendría dado por :

$$Q = v \cdot \frac{\pi \cdot \phi^2}{4}$$

siendo ϕ , el diámetro del conducto.

La sección del conducto resulta ser 2 m^2 .

La densidad de los gases sería en condiciones normales : $\rho = 1,29 - 10 \cdot 0,0049 = 1,24 \text{ kg/Nm}^3$

ya a 80°C sería : $\rho = 1,24 \cdot \frac{273}{353} = 0,96 \text{ kg/m}^3$ efectivo, con lo que la velocidad en el conducto valdría :

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 20}{0,96}} = 20 \text{ m/s}$$

luego el caudal sería de : $Q = 2 \cdot 20 = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, efectivos (a 80°C).

- Determinación de polvo en fuentes estacionarias

La determinación de la concentración de polvo en fuentes estacionarias, exige al objeto de obtener valores representativos, la extracción de muestras en condiciones isocinéticas. Ha de realizarse pues la toma de muestra a una velocidad V_n igual a la velocidad de los gases en el conducto en que se mide V_s .

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 80.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. M I - N E R	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA .	01	10	80

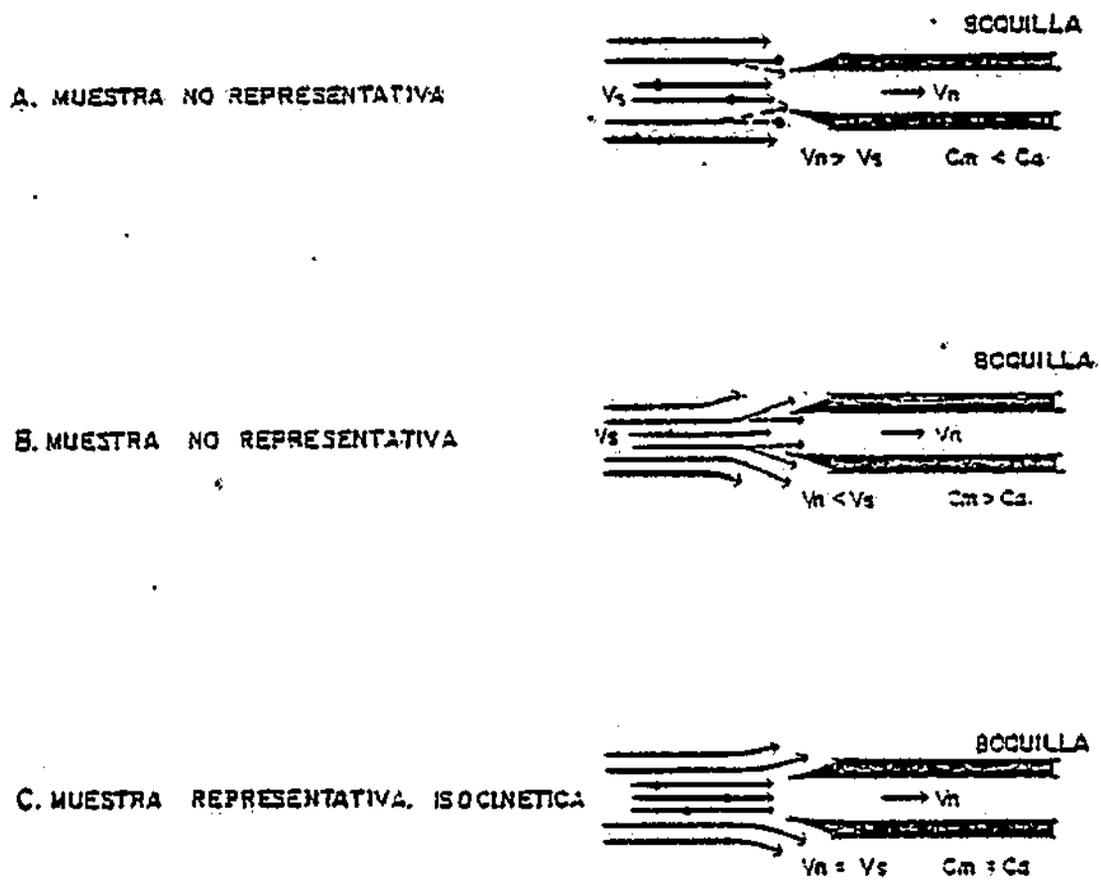


Figura. - 2.7.1.

La Figura 2.7.1., muestra los efectos que sobre la concentración de polvo de la muestra aspirada producen las variaciones de la velocidad V_n respecto a V_s .

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 81		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

En el caso A se observa que para $V_n > V_s$, la concentración de polvo en la muestra, es inferior a la del conducto $C_m < C_a$, debido a que, por su mayor inercia, las partículas de polvo son menos afectadas por la mayor succión que el aire, produciéndose una mayor aspiración de aire que de polvo.

Por el mismo motivo, en el caso B en que $V_n < V_s$, la expansión afecta preferentemente al aire y no a las partículas de polvo, con lo que $C_m > C_a$. Cuando $V_n = V_s$, caso C, se observa que $C_m = C_a$, siendo la muestra tomada totalmente representativa.

La condición de isocinetismo, debe mantenerse durante todo el tiempo que dure la toma de muestra.

Durante el tiempo de toma de muestra V_s varía, por lo que es necesario medirla de forma continua al objeto de lograr una V_n que varíe de igual forma.

De lo expuesto se deduce que cuanto mayor sea el diámetro y la densidad de las partículas, más se apartará su comportamiento respecto al del aire ante las variaciones de velocidad.

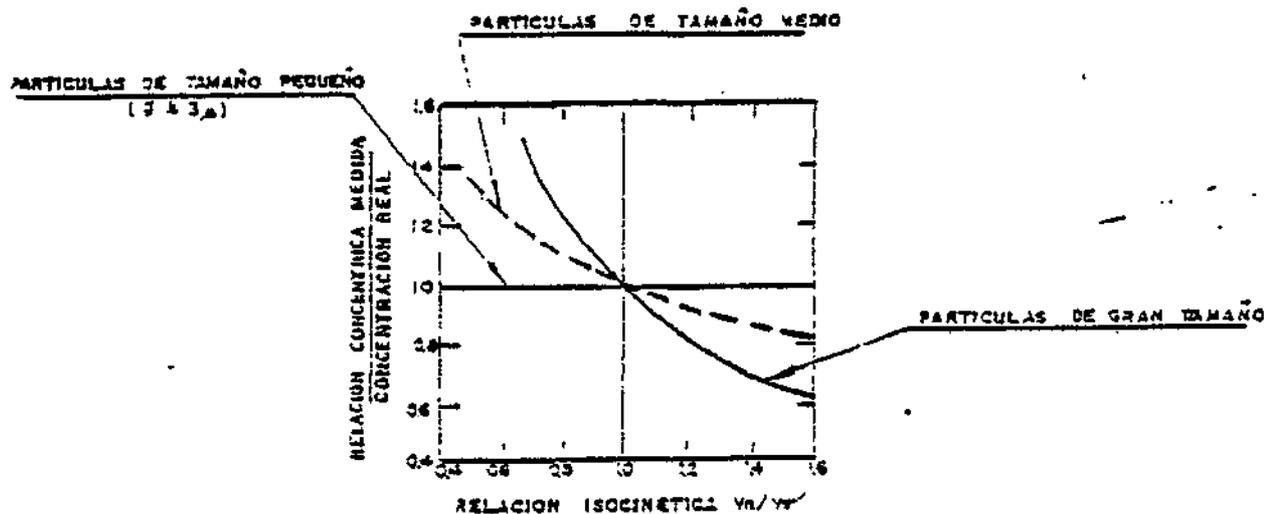


Figura. - 2.7.2.

La Figura 2.7.2., muestra el efecto que, sobre la concentración de polvo en la muestra, produce la razón de velocidades V_n/V_s en función del tamaño medio de partícula.

Se observa que para partículas de $\mu < 1\mu$, la muestra es representativa, aún cuando se tome en condiciones no isocinéticas. Este sería un caso típico al comprobar el rendimiento de un filtro en un horno eléctrico, sobre todo, en la medida de concentración de polvo después del depurador.

La distribución de velocidades en la sección de un conducto circular, varía según se trate de régimen laminar (Fig. 2.7.3.) o turbulento (Fig. 2.7.4.).

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 82.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

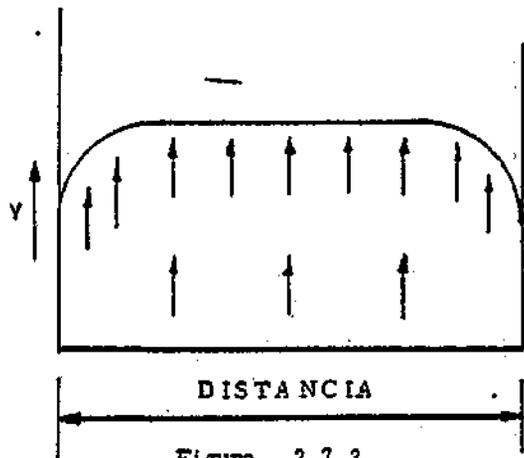


Figura. - 2.7.3.

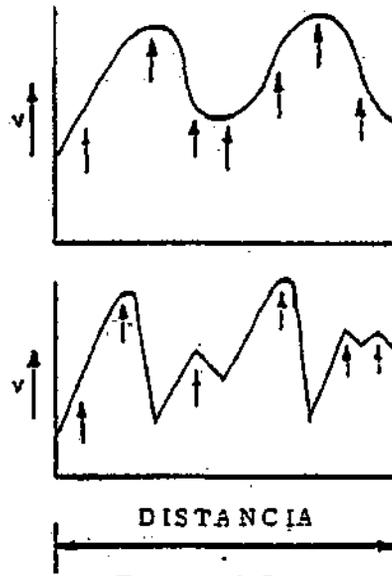


Figura. - 2.7.4.

El conocimiento del perfil de distribución de velocidades en el conducto, es indispensable a la hora de realizar una medida de concentración de polvo.

Es evidente, que el realizar la toma de muestra en un punto en que el régimen sea laminar, facilita enormemente el trabajo al ser mucho más fácil el ajustar las velocidades de forma que $V_s = V_n$ a lo largo de la sección.

A veces, cuando el régimen laminar es muy perfecto, una única medida a una distancia de $\phi/3$ de la pared del conducto, distancia a la que corresponde la velocidad integral media, es suficiente para lograr valores representativos de la concentración de polvo.

En el caso de la Figura 2.7.4., el número de tomas a lo largo de la sección, aumenta enormemente.

En la Figura 2.7.5., se muestra el efecto conjunto de la distribución de velocidades y polvo, pudiendo llegarse a situaciones en las que, debido a remolinos, la velocidad de los gases se invierte.

La realización de medidas correctas en estas situaciones atípicas, que sin embargo son muy frecuentes, es una cuestión de práctica, donde la experiencia juega un importante papel.

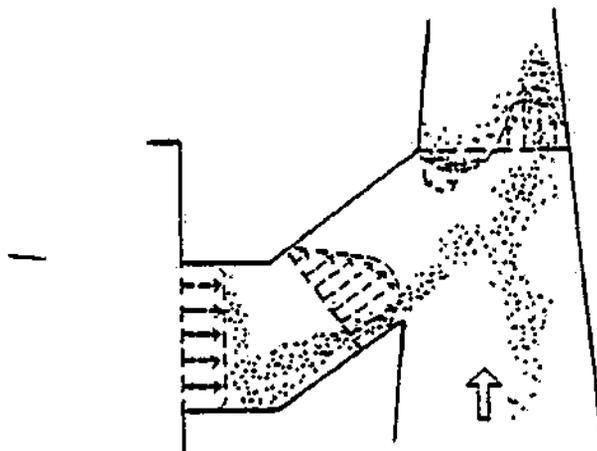


Figura. - 2.7.5.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 83		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

El efecto de la distribución heterogénea del polvo en la sección, se hace más acusado cuando las medidas se realizan sobre conductos horizontales donde, tal como muestra la Figura 2.7.6., la concentración de polvo es mucho mayor en la parte inferior, debido a la deposición de partículas por efecto de la gravedad.

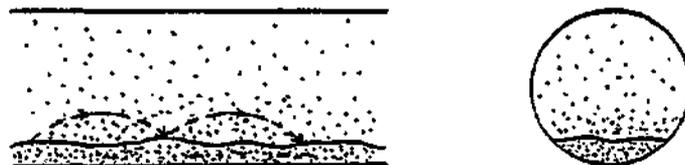


Figura 2.7.6.

Es relativamente frecuente, en instalaciones mal reguladas, la existencia de lechos de polvo sedimentado. En estas condiciones es totalmente imposible el pretender realizar medidas de concentración, aún cuando se tomen todas las precauciones posibles. Existe un arrastre de partículas sobre la superficie del lecho depositado, que crea una corriente de polvo ficticia de concentración mayor a la real, y que ocupa una zona de la sección considerable.

En estos casos, es necesario proceder a realizar la medida en otros puntos y, nunca, dar por válida una medida realizada en estas condiciones.

En un punto fijo de la sección de un conducto, por efecto del proceso productivo de que se trate, la velocidad varía con el tiempo.

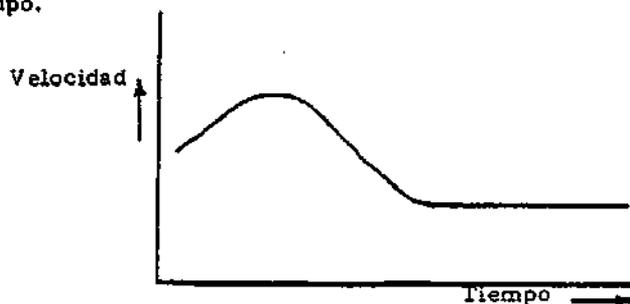


Figura 2.7.7.

No es pues válida una medida en la que, una vez determinada la velocidad de los gases en un punto de la sección del conducto, se proceda a una toma de muestra a esa velocidad. Como ya se indicó, es preciso controlar la evolución de la velocidad con el tiempo (Figura 2.7.7.) para adecuar la velocidad de toma de muestra al valor instantáneo de la misma.

El número de puntos distribuidos a lo largo de la sección transversal en los que se deberán realizar tomas de muestra, al objeto de lograr una media representativa, es función del tipo de régimen reinante en aquella. Este régimen será función de la distancia entre el punto de toma de muestra y el punto en el que se produjo la última perturbación en el caudal, como consecuencia de codos, válvulas, variaciones de sección, empalmes, etc., tanto en el sentido del flujo, como en sentido contrario.

La Figura 2.7.8., indica en función de estas distancias, A y B, el número mínimo de puntos en los que se deberá medir.

La Figura 2.7.9., muestra un caso (punto B) en que habría que medir en 12 puntos (flujo abajo) y 18 puntos (flujo arriba). Si se midiese en otro punto (punto A) serían precisos 12 puntos (flujo arriba) y 48 (flujo abajo).

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2r./,84		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

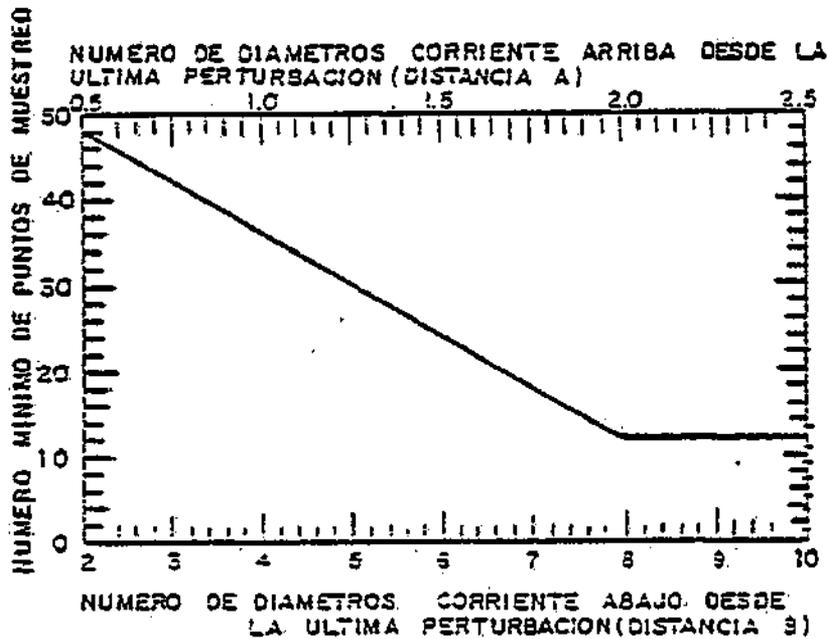


Figura. - 2.7.8.

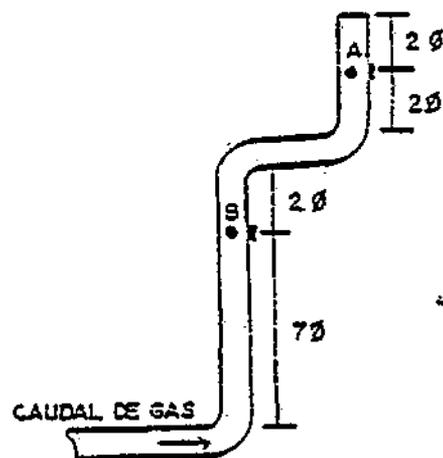
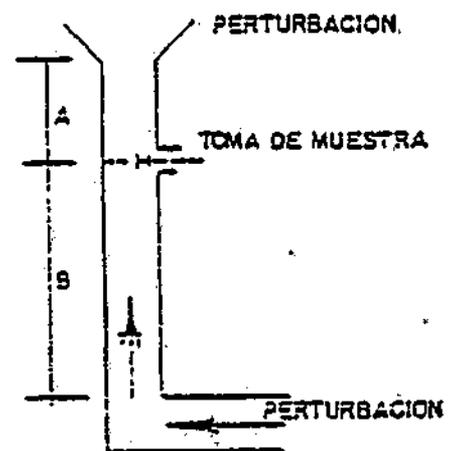


Figura. - 2.7.9.

En este caso sería más conveniente realizar la medida en el punto B, en cuyo caso serían precisos 18 puntos en el caso más desfavorable.

Estos puntos se entienden alineados a lo largo de dos diámetros perpendiculares, por lo que, en el caso de conductos circulares, se toma el múltiplo de 4 mayor más próximo, 20 en este caso.

La Figura 2.7.10., muestra cómo se repartirían sobre la sección, para el caso de 12 puntos de muestreo, según se trate de sección rectangular o circular.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 85		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

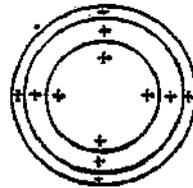
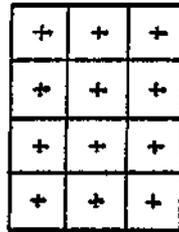


Figura 2.7.10.

Conducto rectangular Conducto circular

En la Tabla 2.7.1. se da, para secciones circulares, las distancias en porciento del diámetro a la que deberán localizarse cada uno de los puntos de muestreo alineados sobre un diámetro. En el caso ya visto en el que había que medir en 20 puntos (10 sobre cada uno de los dos diámetros perpendiculares).

Si el diámetro de un conducto es inferior a 600 mm., el número de puntos de muestreo que da la figura 2.7.8 puede multiplicarse por 0,67.

Ninguna medida podrá realizarse a menos de 25 mm. de la pared interior del conducto.

Por último, para conductos rectangulares del diámetro equivalente, se toma de acuerdo con la expresión $D = \frac{A \times L}{A + L}$, siendo A el ancho y L el largo de la sección rectangular.

	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	14.6	6.7	4.4	3.3	2.5	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3	1.1	1.1
2	85.4	25.0	14.7	10.5	8.2	6.7	5.7	4.9	4.4	3.9	3.5	3.2
3		75.0	29.5	19.4	14.6	11.8	9.9	8.5	7.5	6.7	6.0	5.5
4		93.3	70.5	32.3	22.6	17.7	14.6	12.5	10.9	9.7	8.7	7.9
5			85.3	67.7	34.2	25.0	20.1	16.9	14.6	12.9	11.6	10.5
6			95.6	80.6	65.8	35.5	26.9	22.0	18.8	16.5	14.6	13.2
7				89.5	77.4	64.5	36.6	28.3	23.6	20.4	18.0	16.1
8				96.7	85.4	75.0	63.4	37.5	29.6	25.0	21.8	19.4
9					91.8	82.3	73.1	62.5	38.2	30.6	26.1	23.0
10					97.5	88.2	79.9	71.7	61.8	38.8	31.5	27.2
11						93.3	85.4	78.0	70.4	61.2	39.3	32.3
12						97.9	90.1	83.1	76.4	69.4	60.7	39.8
13							94.3	87.5	81.2	75.0	68.5	60.2
14							98.2	91.5	85.4	79.6	73.9	67.7
15								95.1	89.1	83.5	78.2	72.8
16								98.4	92.5	87.1	82.0	77.0
17									95.6	90.3	85.4	80.6
18									98.6	93.3	88.4	83.9
19										96.1	91.3	86.8
20										98.7	94.0	89.5
21											96.5	92.1
22											98.9	94.5
23												96.8
24												98.9

TABLA 2.7.1.

Número de puntos de muestreo sobre un diámetro.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 86.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Los equipos de toma de muestra disponibles en el mercado y fabricados de acuerdo con la norma V de la E.P.A., constan de las siguientes partes (Figura 2.7.12.):

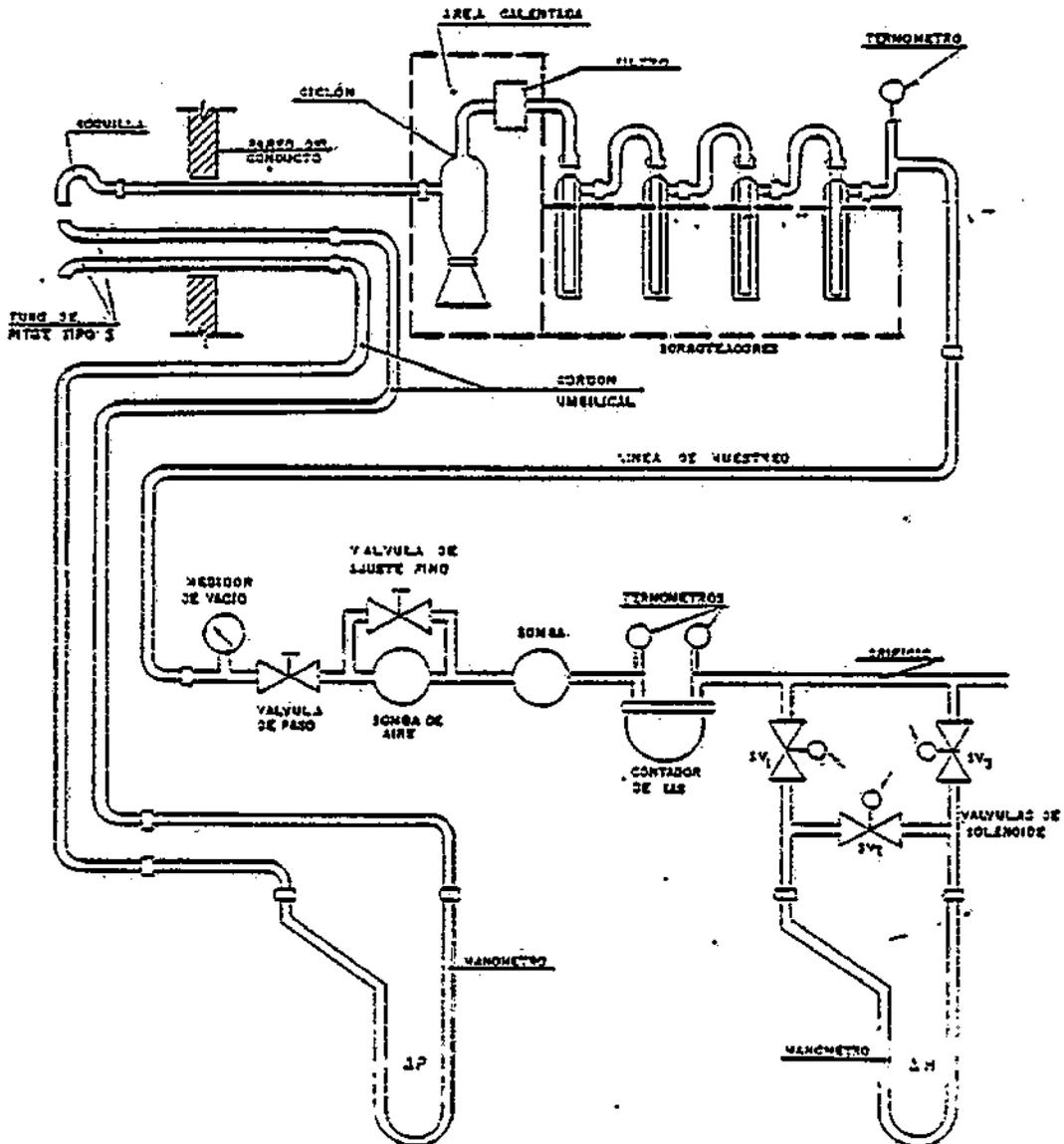


Figura. - 2.7.12.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 87		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

A. - Una sonda de toma de muestra, calentable mediante resistencia eléctrica, provista de un tubo de pitot tipo D y tres boquillas de 1/4, 3/8 y 1/2 pulgadas. Un juego de boquillas completo, comprendiendo valores intermedios, es aconsejable.

B. - Una unidad de muestreo, comprendiendo :

1. Una cámara calentable en cuyo interior se alojan :
 - Un ciclón con tolva y un by-pass para el mismo.
 - Un filtro integral.
2. Una caja refrigerada mediante hielo en la que se alojan cuatro borboteadores con sus conexiones.

C. - Una unidad de control que incluye :

- Una bomba de vacío.
- Un contador de gas seco.
- Manómetros diferenciales.
- Un orificio calibrado.
- Un indicador de vacío.
- La conexión eléctrica a la red.

D. - Un cordón umbilical que conecta eléctrica y neumáticamente la unidad de muestreo a la de control.

E. - Un nomógrafo para la consecución de las condiciones de isocinetismo.

F. - Una variedad de conexiones entre la sonda y las dos partes de la unidad de muestreo, entre el tubo de pitot y la unidad de control, etc.

En la unidad de muestreo se dispone de dos medidores de temperatura, uno da la temperatura a la que se regula la cámara calentable, mediante un reostato, y otro la temperatura de salida de los gases tras el cuarto borboteador.

La unidad de control dispone de los siguientes indicadores :

- Temperatura de los gases en la chimenea.
- Temperatura de la sonda (regulable)
- Temperaturas antes y después del contador de gas seco.
- Presión dinámica en el tubo de pitot tipo S (ΔP).
- Presión dinámica en el orificio calibrado (ΔH).
- Volumen medido en el contador de gas seco.
- Controlador de tiempo de muestreo.

así como de los mandos de control y ajuste del caudal de aspiración y los interruptores de todas las conexiones eléctricas.

La figura 2.7.13., muestra un esquema simplificado del aparato recomendado por E.P.A.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 88.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

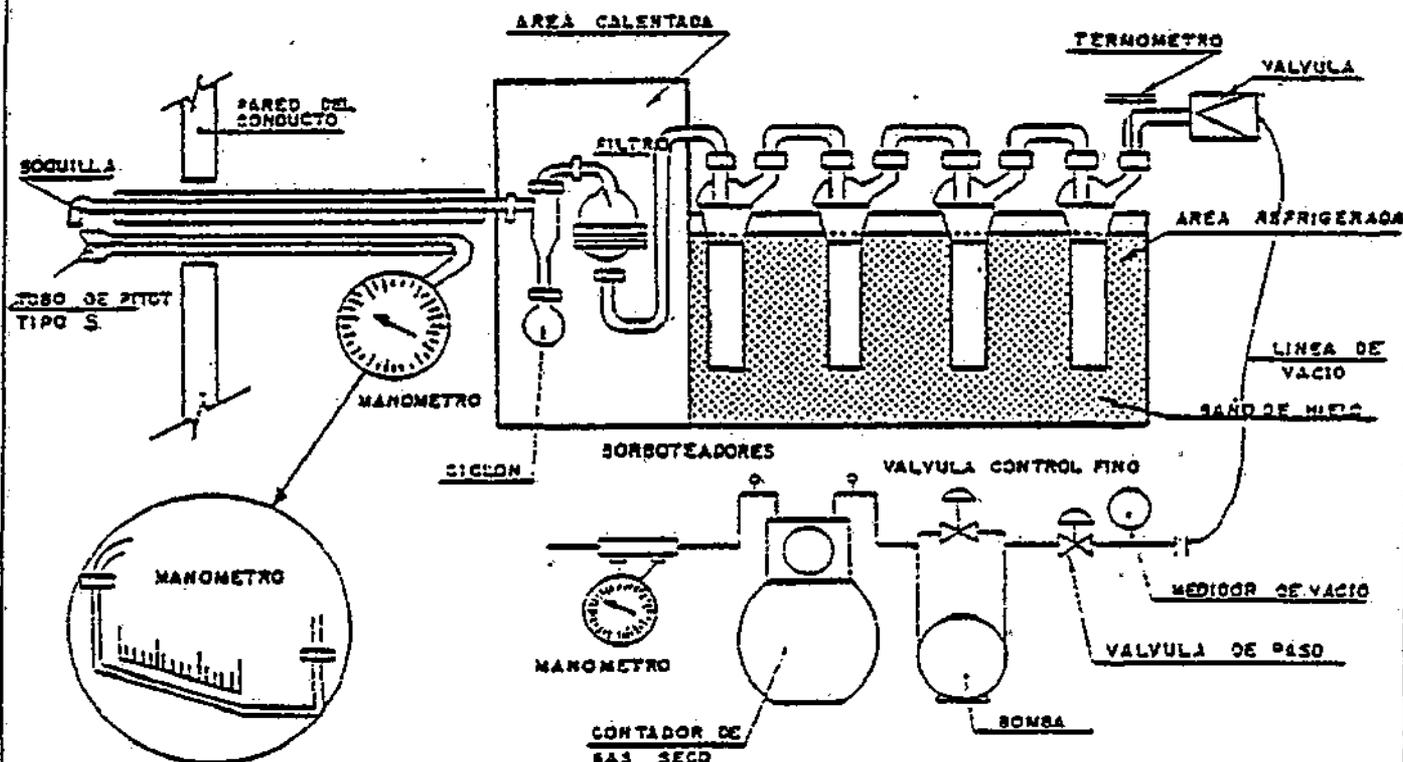


Figura. - 2.7.13.

Para la realización de las medidas isocinéticas, aparte de la sonda propiamente dicha, son necesarios los siguientes elementos auxiliares:

- Un cubo cerrado para el transporte del hielo.
- Un termopar y un potenciómetro para la medida de la temperatura de los gases en la chimenea (caso de no estar incluido en la sonda).
- Un tubo de pitot standard, un manómetro diferencial para la localización del punto de toma de muestra.
- Papel de filtro de fibra de vidrio Gelman tipo A, de dimensiones adecuadas al tamaño del filtro a emplear. Pueden llegar a hacer falta hasta tres papeles de filtro por medida en el caso de grandes concentraciones de polvo.
- Un estuche de plástico para guardar los papeles de filtro antes y después de cada medida.
- 200 gr. de sílica-gel, para desecar los gases una vez borboteados. Cada determinación consume prácticamente los 200 gr. contenidos en el cuarto borboteador.
- 200 ml. de agua destilada, 100 para cada uno de los dos primeros borboteadores.
- 250 gr. de acetona para la limpieza interior de la sonda al final de cada medida, al objeto de recuperar el polvo adherido en su interior.
- Una botella para la cetona y otra para el agua destilada.
- Una balanza para pesar la sílica-gel antes y después de la medida, así como el papel de filtro.
- Un vaso de 200 ml. graduado para medir el agua destilada inicial y el condensado recogido.
- Cuatro botellas de por lo menos 500 ml., resistentes a los ácidos, para recoger el agua destilada y el con

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 89		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

densado, así como la acetona utilizada en la limpieza del filtro y la sonda.

- Unas pinzas para extraer el papel de filtro del filtro.
- Un analizador Orsat para determinar la composición de los gases.
- Cepillos para la limpieza de la sonda.
- Hojas normalizadas para apuntar los resultados obtenidos.
- Equipo de protección personal (monos antiácido, guantes, botas, mascarillas, etc.).

Previa a la utilización de la sonda, hay que realizar una serie de calibraciones, como las que a continuación se exponen.

La Figura 2.7.14., muestra la disposición del tubo de pitot standar, mediante el cual se puede determinar la diferencia de presión entre la presión total P_p y la presión estática P_w . A este valor $P = P_p - P_w$, se le denomina presión dinámica.

Aplicando Bernouille a los puntos P y W, se puede calcular el valor de la velocidad V_s mediante :

$$V_s = \sqrt{2g \frac{\Delta P}{\rho}}$$

donde g , es la constante de gravitación y ρ la densidad del gas.

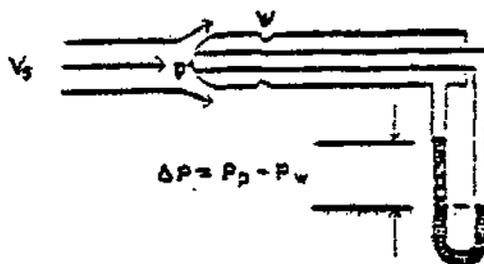


Figura. - 2.7.14.

En realidad, la expresión que nos da la velocidad mediante el tubo de pitot standard, es :

$$V_s = C_p \sqrt{2g \frac{\Delta P}{\rho}}$$

siendo C_p , un coeficiente que vale prácticamente la unidad.

En la Figura 2.7.15., se muestra la configuración del tubo de pitot en S, que es el que se emplea en la sonda isocinética. La expresión que da V_s , en función de ΔP , es idéntica a la vista pero, ahora, C_p ya no vale la unidad. El valor de C_p en el pitot tipo S, hay que determinarlo para cada tubo y, por lo general, oscila en torno a 0,85. El valor del ΔP medido mediante el tubo de pitot en S, es mayor que el obtenido con el tubo de pitot standard, debido a que por encontrarse opuesto al flujo en vez de perpendicular, $P_s < P_w$.

Este hecho presenta la ventaja de una mayor precisión en la medida, ya que al dar lugar a valores de ΔP mayores, el error de lectura disminuye.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 90.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

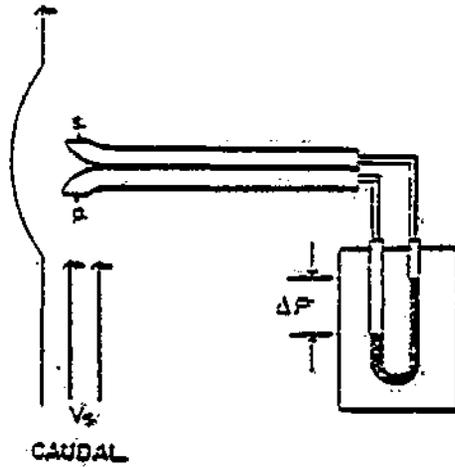


Figura. - 2.7.15.

El empleo del tubo de pitot en S, es debido a que para aire con polvo no se taponan los orificios, por su gran tamaño, mientras que en el standard, al poco tiempo de exposición a un flujo pulverulento, se taponan los orificios W.

Aplicando a un mismo caso el tubo en S y el standard, obtendríamos dos lecturas ΔP_1 e ΔP_2 , e igualando las velocidades obtenidas de la aplicación de la fórmula de Bernouille, teniendo en cuenta que para el standard C_p vale prácticamente la unidad,

$$C_p \sqrt{2g \frac{\Delta P_1}{\rho}} = \sqrt{2g \frac{\Delta P_2}{\rho}}$$

luego :

$$C_p = \sqrt{\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2}} \quad 1/2$$

ΔP_1	ΔP_2	$C_p = \left(\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2}\right)^{1/2}$
0.495	0.360	0.852
0.465	0.350	0.868
0.345	0.295	0.924
0.315	0.235	0.863
0.250	0.185	0.360
0.214	0.160	0.864
0.132	0.09	0.826
0.056	0.035	0.791

Figura 2.7.16.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 91	
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A	
E.O.I. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10 80

En la Figura 2.7.16. se muestra una tabla de valores de C_p para distintos pares de valores de ΔP , medidos con el tubo en S y el standard. Con estos valores, se puede trazar una curva de calibración del tubo de pitot en S, que da el valor de C_p en función de la lectura de ΔP , tal como indica la Figura 2.7.17.

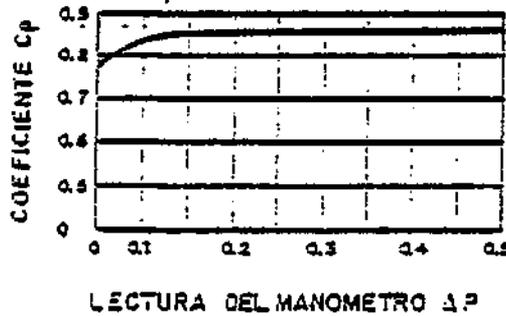


Figura. - 2.7.17.

Por último, la Figura 2.7.18., presenta el equipo empleado para la calibración de los tubos de pitot en S.

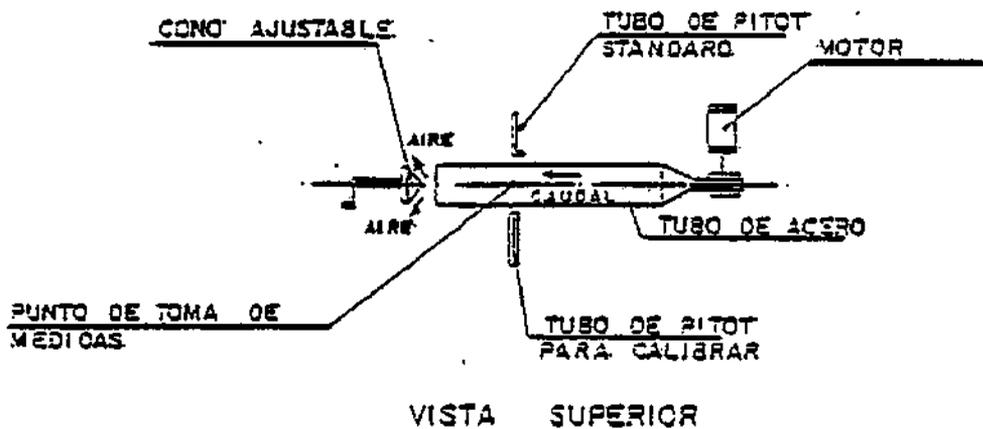


Figura. - 2.7.18.

Antes de utilizar en campo una sonda isocinética, es imprescindible realizar una calibración como la vista al objeto de obtener la curva de la Figura 2.7.17.

Otro valor que es necesario calibrar, es la presión standard del orificio calibrado ΔH_3 , definida como el valor medido para ΔH , cuando por la sonda se aspiran 0,75 cfm a 70°F y 29,92 pulgadas de mercurio de presión. Viene dado por la expresión :

$$\Delta H_3 = \frac{Q_3^2 P_3 M_3}{\text{km}^2 T_3}$$

donde :

$$Q_3 = 0,75 \text{ cfm}$$

$$P_3 = 29,92 \text{ pulgadas C.D.Hg}$$

$$M_3 = 29 \text{ (peso molecular del aire seco)}$$

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 92.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E. O. I. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

$$T_2 = 5302 R$$

km = coeficiente propio del aparato

$$\text{luego, } \Delta H_2 = \frac{0,92}{km^2}$$

Hay que determinar pues previamente el valor de km.

Para calcular km, se procede del siguiente modo.

- Se conecta la bomba de aspiración y se ajustan las válvulas de modo que la lectura de ΔH sea 0,5 pulgadas de c.d.A.
- Simultáneamente se lee la lectura del medidor de caudal V_1 y se conecta el contador de tiempo.
- Se opera en estas condiciones un tiempo θ y, al final del mismo, se anota la lectura del contador de gas - (V_p).
- Se anotan durante el tiempo θ los valores de las temperaturas a la entrada y salida del medidor de caudal T_1 y T_2 .
- Se repiten todas estas operaciones ajustando el valor de ΔH a 1, 2 y 6 pulgadas de c.d.A.
- Para cada uno de los cuatro casos, se calcula el caudal Q_m mediante :

$$Q_m = \frac{V_i - V_f}{\theta} \frac{T_2 + 460}{\frac{T_1 + T_2}{2} + 460}$$

Con cada Q_m se calcula un km, según la expresión : $km = Q_m \frac{P_m M_m}{T_m \Delta H}$

donde :

$P_m = P_{atm} = 29,92$ en pulgadas de mercurio.

$M_m = M_{aire} = 29$ (peso molecular).

$T_m = T_2 + 460$ (°R)

$\Delta H =$ el valor prefijado.

Se cumplimenta así la tabla de la Figura 2.7.20., obteniéndose 4 valores de km. La media aritmética de estos valores es el km buscado.

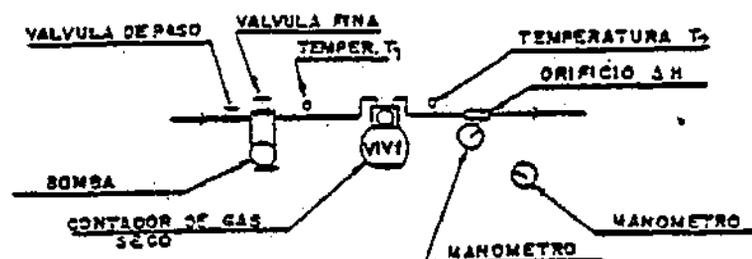


Figura. - 2.7.19.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.21./98		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

H in. H ₂ O	V _i cf	V _r cf	φ min.	T ₁ °F	T ₂ cf	V ₂ -V ₁ cfm	K _m
0.5							
1.0							
2.0							
6.0							

Figura 2.7.20.

Las sondas isocinéticas comerciales fabricadas de acuerdo al método V de la E.P.A., están provistas de un nomógrafo que permite calcular las condiciones de isocineticismo. La consecución del isocineticismo, no depende, en teoría, del tamaño de la boquilla utilizada en el pico de la sonda, si bien en la práctica, existen ciertas limitaciones según el diámetro de la boquilla empleada, así como de la capacidad de aspiración de la sonda, la eficacia del filtro y el caudal que atraviesa los borboteadores.

Cuando en el gas hay partículas de gran tamaño, el empleo de una boquilla de pequeño diámetro, conduce a errores. A medida que la razón del área de la boquilla a la sección de la chimenea disminuye, aumenta la probabilidad de lograr muestras no representativas.

Con la ayuda del primer nomógrafo, Figura 2.7.21., se obtiene un factor de corrección C, dependiente de varias variables y que es un dato de entrada para el segundo nomógrafo, Figura 2.7.22.

Antes de utilizar el primer nomógrafo, es necesario conocer cuatro parámetros. Estos parámetros son :

- Presión standard ΔH_p , a través del orificio calibrado cuando por la sonda se aspiran 0,75 pies cúbicos por minuto de gas seco a 70°F y una presión absoluta de 29,92 pulgadas de columna de mercurio. Es un valor único para cada sonda y se ha de determinar como hemos visto experimentalmente.
- Porcentaje de humedad en los gases. Este parámetro debe determinarse antes del muestreo, bien sea mediante absorción en sílica-gel, o haciendo un muestreo preliminar con la sonda y absorbiendo la humedad en los borboteadores. En este caso, no es preciso que el muestreo sea isocinético.
- La temperatura de los gases a su paso por el orificio calibrado, es decir, la temperatura a la salida del contador de gas. Cuando se realice el muestreo se podrá leer en el indicador con que va provista la caja de control, pero ya que es necesario conocerla de entrada, un valor 10°F superior a la temperatura ambiente suele dar buen resultado, el cual se deberá comprobar en el momento de realizar la medida y, en caso de discrepancia apreciable, recomenzar todo el proceso que se está describiendo.
- La relación entre las presiones absolutas del gas en la chimenea y en la sonda. Esta relación es prácticamente la unidad.

Conocidos estos cuatro parámetros, el factor C se calcula de la siguiente forma (Figura 2.7.21.) :

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 94.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

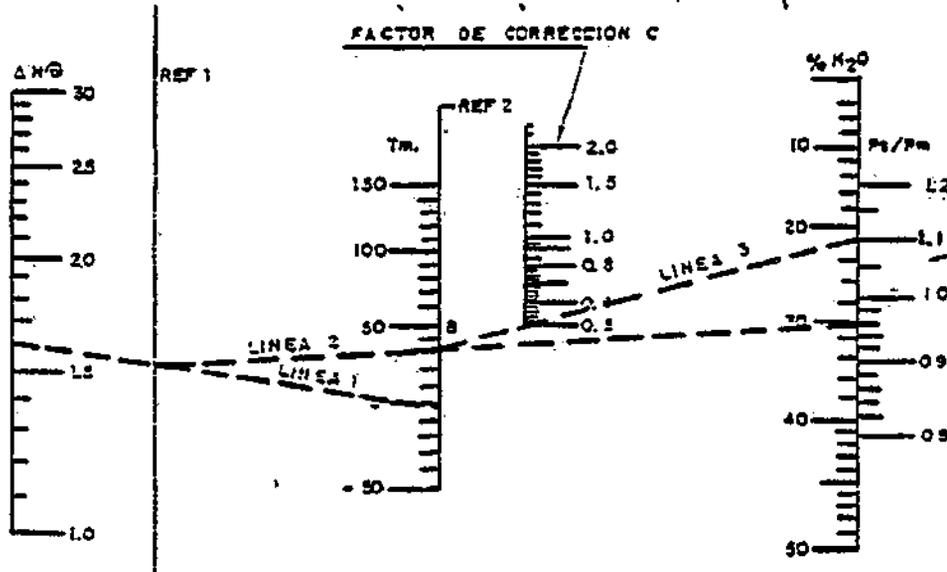


Figura. - 2.7.21.

Sobre la línea ΔH_2 se marca el valor encontrado experimentalmente (1,6 pulgadas C.d.A. en el caso de la Figura 2.7.21.). Sobre la escala T_m , el valor de la temperatura de orificio (09°F). Uniendo estos dos puntos se obtiene el punto A sobre la línea de referencia 1. Fijado el $\% \text{H}_2\text{O}$ (30%) y uniendo este punto con el A, se obtiene el punto B sobre la línea de referencia 2. La unión de este punto con el de relación de presiones absolutas (1,1) nos da en su intersección con la escala C, un valor de $C = 0,51$ para el coeficiente de corrección.

Una vez determinado el valor de C con el primer nomógrafo, se realiza una primera exploración de la chimenea con la sonda, pero con la bomba de aspiración desconectada. Esta exploración no tiene más objeto que el determinar el tamaño de boquilla a emplear y dejar el nomógrafo dispuesto para ser empleado durante el muestreo.

Obtenemos pues un valor de ΔP con el que se entra en el segundo nomógrafo, junto con el valor de C ya calculado.

Se suponen como ejemplo del empleo de este segundo nomógrafo, los siguientes datos de partida :

$$C = 2$$

$$\Delta P = 0,3 \text{ pulgadas C.d.A.}$$

$$T_s = 500^{\circ}\text{F} \text{ (temperatura en la chimenea).}$$

Se mueve la regleta deslizante hasta hacer coincidir el valor $C = 2$ con la línea de referencia del factor de corrección. Solidariamente con ésta, se mueve la escala de temperatura del gas en la chimenea.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 95.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Se marca el valor $\Delta P = 0,3$ y con la regla de plástico que pivota sobre la línea k, se alinean este punto con el $T_s = 5002F$. La intersección de la regla de plástico con la escala de diámetros de boquillas, nos da el va lor ideal, $D = 0,27$.

Se selecciona el tamaño de boquilla más cercano al ideal (0,25 en nuestro caso).

Uniendo el valor $D = 0,25$ con $T_s = 5002F$, se obtiene un nuevo valor de $\Delta P = 0,41$ (línea 2).

Unimos este valor de ΔP con la marca de referencia situada sobre la escala de valores de ΔH . La regleta pivotará entonces sobre un punto. Se fija mediante apriete de la palomilla este punto, sobre el que la regla puede pivotar quedando fija.

Ya está el nomógrafo listo para obtener con él la condición de isocinetismo.

Se procede, a continuación, a colocar la boquilla seleccionada en el extremo de la sonda, quedando ésta lis ta para su uso.

Para conseguir el isocinetismo durante el muestreo, es suficiente con ajustar mediante las válvulas de con trol de la bomba de aspiración, el valor de ΔH para cada valor de ΔP leído. En efecto, pivotando la regla de plástico sobre el punto k y alineándolo con el valor de ΔP leído, se obtiene el valor de ΔH que hay que ajustar para conseguir una toma isocinética.

Así, por ejemplo, para $\Delta P = 1$, la línea 4 nos indica que deberemos ajustar las válvulas de aspiración de modo que ΔH valga 4,55 (línea 4) en cuyo caso, el muestreo que estemos realizando será isocinético.

El punto de pivotamiento permanecerá inalterable siempre que :

- T_s no varíe más de 252F si $T_s < 10002F$ ó 502F si $T_s > 10002F$.
- No sea necesario cambiar la boquilla (ΔH ha de permanecer entre 0,3 y 6,0, si no es así, será preciso cambiar el tamaño de la boquilla).
- T_m haya sido correctamente supuesta y no varíe más de 102F.
- La humedad permanezca constante y no varíe más de $\pm 1\%$.
- La relación de presiones absolutas permanezca constante.

Si alguno de estos parámetros varía más de los límites indicados será preciso volver a preparar el nomó- grafo.

El modo de operar con la sonda isocinética será pues el siguiente. Se selecciona el punto de toma de mues- tra, y una vez determinados el número y ubicación de puntos de medida, se procede al cálculo del factor de corrección C.

Se instala en el punto de medida la caja de muestreo y se elige la longitud de sonda idónea al caso en parti- cular. Se conecta la sonda a la unidad de muestreo y se realizan las conexiones mediante el cordón umbili- cal con la caja de control, que puede distar más de 70 metros de aquélla.

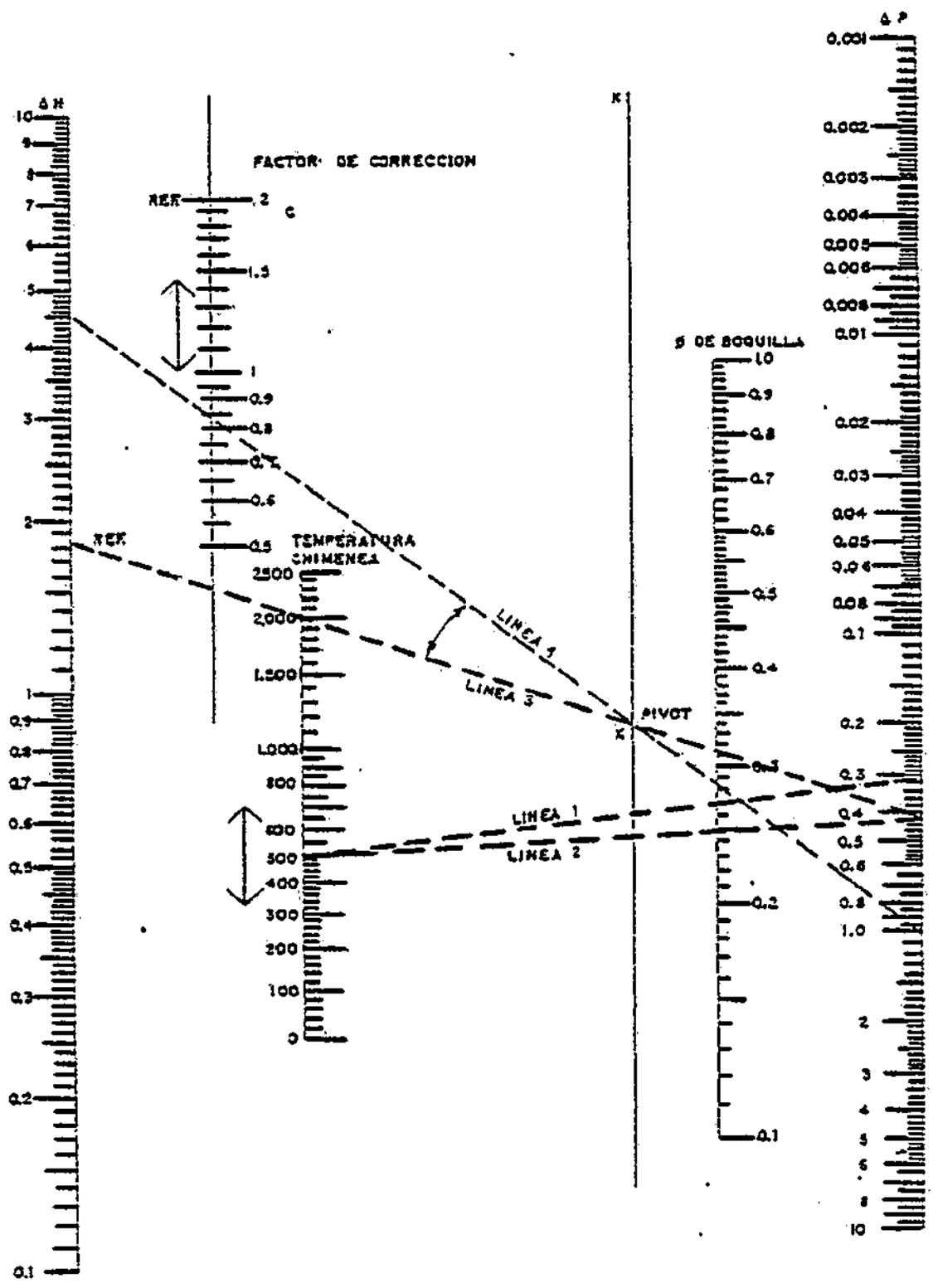


Figura. - 2.7.22.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 97,		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Se regula el termostato de la caja de muestreo a 250°F y se conecta durante 15 minutos el calentamiento de la sonda. Se pone el agua destilada y la sílica-gel en los borboteadores y se añade hielo y sal al baño de refrigeración. Se selecciona el tipo de boquilla, tal como se ha visto, y se prepara el nomógrafo 2 para su empleo.

Se coloca la boquilla y se inicia el muestreo, procurando que la temperatura de los gases a la salida del último borboteador no supere los 70°F, midiendo de 5 a 10 minutos en cada punto de muestreo, empleando el nomógrafo para conseguir el isocinetismo. Se cumplimenta la hoja de datos.

Puesto que las sondas son de fabricación norteamericana, es preferible cumplimentar la hoja de datos de campo en unidades inglesas y después rellenar su hoja equivalente en unidades métricas.

En oficina se procede a expresar el caudal aspirado en condiciones normales, haciendo las oportunas correcciones.

$$Q_{CN} = Q_{real} \frac{273}{273 + T} \frac{P_{bar} + \Delta H / 13,6}{760}$$

donde :

- Q_{CN} = es el caudal expresado en C.N. y m^3 .
- Q_{real} = el caudal aspirado en las condiciones de operación.
- T = la temperatura media en el contador de gas en °C.
- P_{bar} = la presión barométrica en el orificio calibrado mm. cdHg.
- ΔH = la presión a través del orificio calibrado mm. CdA.

El filtro, una vez desecado, se pesa y se compara con el peso inicial, boteniéndose por diferencia el polvo recogido.

La sonda y la boquilla se llevan también al laboratorio, se limpian con acetona para recoger el polvo depositado en su interior. La acetona del lavado se evapora, recuperándose el polvo que se pesa, la cantidad final de polvo, suma de la del filtro y de la recogida en la acetona, será los n mg de polvo captados.

La concentración vendrá dada por :

$$C_{CN} = \frac{n}{Q_{CN}} \text{ mg/Nm}^3$$

valor que coincidirá con el de los gases en la chimenea.

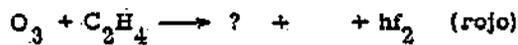
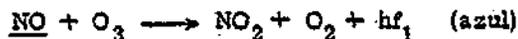
Próximamente, el Ministerio de Industria y Energía publicará los métodos de toma de muestras y análisis de los principales contaminantes atmosféricos de origen industrial, tales como SO_2 , SO_3 , nieblas de H_2SO_4 , NO_x , SH_2 , halógenos, etc.

A continuación, se hace una breve descripción de algunos tipos de análisis automáticos para distintos contaminantes.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 21. / 98.		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. N I N E R	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Quimiluminiscencia. - El método de análisis está basado en la cuantificación de la luz desprendida al reaccionar dos gases bajo determinadas condiciones.

Esta técnica se ha desarrollado para el análisis de los óxidos de nitrógeno NO₂/NO y el O₃, basándose respectivamente en las siguientes reacciones:



En estas dos reacciones, cuando uno de los componentes se encuentra en exceso, la intensidad de quimiluminiscencia obtenida, es proporcional a la concentración del otro componente.

Estas reacciones se llevan a cabo en el interior de cámaras termostalizadas, que trabajan en depresión al objeto de favorecer el recorrido libre medio de las moléculas gaseosas.

La cámara termostalizada va provista de un filtro óptico adaptado a la frecuencia de la radiación que se desea medir.

Una vez filtrada, la radiación atraviesa un tubo fotomultiplicador y la señal eléctrica resultante se amplifica con un electrómetro-amplificador. Para mantener un buen grado de estabilidad y un bajo nivel de ruido, tanto el fotomultiplicador como la cámara de reacción, se mantienen a temperatura controlada. Dicha temperatura puede establecerse en 5°C mediante efecto termozónico (efecto Peltier) con lo que se consigue una relación señal/ruido ≤ 3 .

El método de medida es en ambos casos específico, por lo que no presenta interferencias, y la respuesta es lineal para cualquier concentración, siendo el mínimo detectable 0,001 ppm para el de ozono y 0,005 para el de óxidos de nitrógeno.

En la práctica de los 5 óxidos de nitrógeno presentes en la atmósfera (NO-NO₂-NO₂O₄-N₂O-N₂O₃), tan sólo tiene interés la evaluación de los dos primeros, ya que los restantes, por lo general, sólo alcanzan el nivel de trazas.

El NO, es el que se forma principalmente en los procesos de combustión, mediante reacción del O₂ y el N₂ a altas temperaturas. En el aire el NO se oxida a NO₂, mucho más nocivo que aquél. Puesto que el método de análisis descrito es únicamente válido para el NO, el monitor lleva incorporado un convertidor catalítico, generalmente de carbón, que transforma el NO₂ presente en el atmósfera en NO. Este convertidor trabaja a 350°C, ya que por encima de los 400°C, el NH₃ también pasa a NO y se producirían interferencias.

Así pues, el analizador evalúa conjuntamente el NO atmosférico junto con el procedente de la conversión del NO₂. Un sistema automático de by-pass y memorias, permite determinar secuencialmente la suma de ambas corrientes NO + NO₂ = NO_x y únicamente el NO atmosférico. Una tercera memoria proporciona la diferencia de ambas lecturas y, por tanto, el NO₂.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2:2: / 99.		
	3	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

Dado el peligro que supone el manejo de botellas de O_3 , el monitor lleva incorporado un ozonizador, que lo genera a partir del oxígeno puro de una botella auxiliar. El ozonizador, es un generador del tipo de descarga, formado por un cilindro de vidrio y un electrodo interno, la parte externa del cilindro está recubierta con una pintura de plata conductora, que en realidad forma el otro electrodo necesario para efectuar la descarga eléctrica que conduce a la formación de ozono.

El monitor de ozono consume un caudal de C_2H_4 del 99,9% de pureza de 40 cc/min a 2 atm., igual caudal que el O_2 consumido por el monitor de óxidos de nitrógeno en iguales condiciones.

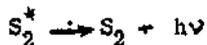
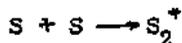
Analizador de SO_2 - Fotometría de llama

Su principio de funcionamiento se basa en la detección, por un fototubo, de la radiación emitida por los compuestos de azufre, al ser quemados en una llama muy rica en hidrógeno. Un filtro óptico, de paso de banda muy estrecho, deja pasar la línea de 394 m μ , como principal línea de resonancia de los compuestos azufrados, debidamente focalizada para obtener la mayor sensibilidad.

La muestra de aire tomada del ambiente, y filtrada de partículas sólidas, es succionada y regulada por el sistema neumático formado por la bomba de aspiración y el rotámetro de aire, que determina su presión de entrada al cabezal quemador. La llama del quemador se enciende por el flujo de H_2 , tomado de un generador comercial o a partir de una botella standard insertado en la línea de entrada. En esas condiciones, se produce la combustión del aire conteniendo SO_2 , en la llama rica de H_2 , lo que da lugar a la siguiente reacción :



Los compuestos volátiles de azufre al quemarse en presencia de H_2 se recombinan, dando lugar a una llama azulada de características quemiluminiscente, con emisión de azufre activado, dado por la reacción :



Finalmente, el S_2 (desactivado) se combina con el O_2 presente en la cámara, dando lugar al desprendimiento de SO_2 al exterior.

La molécula de S activada lo está por encontrarse en un nivel superior de energía, que al revertir a su nivel inferior, emite una radiación espectral de banda estrecha centrada en su máxima intensidad en la frecuencia de 3.940 Å. Al necesitarse dos átomos de azufre para formar una molécula de S_2 , activada, la intensidad máxima de emisión quemiluminiscente resulta proporcional al cuadrado de la concentración de átomos de azufre en la llama, relación que se aplica al final del proceso para la calibración de la salida analógica del tubo fotomultiplicador. Los productos residuales de la combustión, tales como vapor de agua, exceso de H_2 y nitrógeno, son succionados continuamente por la bomba aspiradora conectada a la salida del bloque quemador, donde además se regula la entrada de aire al mismo, bajo la indicación del rotámetro. La eliminación del H_2S contenido en el aire ambiente, se realiza con un filtro catalítico (scrubber) con lo cual se asegura un elevado rendimiento de detección para el SO_2 , contaminante utilizado como trazador en la mayor parte de las redes de vigilancia existentes.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2.1. / 100		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

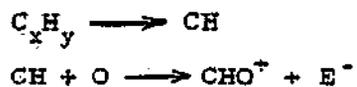
La intensidad, variable en el tiempo de la emisión quimiluminiscente, pasa a un tubo fotomultiplicador a través del filtro óptico centrado en 3.940 \AA , siendo amplificado hasta un nivel en que es posible su detección y conversión de señal luminosa en corriente eléctrica, cuya amplitud resulta, a través de las constantes físicas del sistema de conversión de energía, proporcional a la concentración del SO_2 en la muestra de aire, sea en mgr/m^3 , ppm. o ppb., dependiendo de la sensibilidad del analizador.

La salida del T.F.M. (tubo foto-multiplicador) se conecta al módulo electrónico, formado esencialmente por un amplificador y circuito analógico de salida, que en los analizadores comerciales corresponde a un voltaje variable entre 0-1 V ó 0-5 V, proporcional a través de una curva de calibración, a la variación en los niveles de SO_2 en el aire analizado.

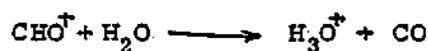
El sistema neumático, fundamental en estos aparatos, se completa con los módulos de calibración para total escala y cero.

Analizador de Hidrocarburos. Ionización de llama

El funcionamiento de este analizador se basa en la ionización de moléculas de hidrocarburos contenidas en una muestra de aire, por efecto de una llama rica en H_2 . La reacción que tiene lugar en el quemador, similar al utilizado para la detección del SO_2 , produce radicales del tipo CH, que reaccionan con radicales de O para formar iones positivos de carbono y electrones libres, de acuerdo a las siguientes reacciones :



Los radicales CHO reaccionan a su vez con agua, dando lugar a :



Al bloque quemador llegan simultáneamente la muestra de aire, a través de una válvula y H_2 de un generador o botellón. La llama producida por la combustión del aire da lugar a una ionización dentro del quemador, mediante la aplicación de un voltaje de c. c. entre la muestra ionizada y el cuerpo del quemador, produciéndose una corriente eléctrica proporcional a la cantidad de iones capturados, esto es, proporcional a la concentración de hidrocarburos totales contenidos en la muestra de aire quemada. Esta corriente es luego amplificada y llevada a los terminales de salida del aparato, para su registro o transmisión a distancia. El mismo analizador es capaz de medir metano, para lo cual la válvula conecta la entrada de aire con una cámara de oxidación, que oxida todos los hidrocarburos menos el metano que es retenido en una unidad catalizadora, y pasa luego al bloque quemador produciendo su combustión por la llama de H_2 , y dando lugar a una corriente eléctrica proporcional a la concentración de metano en la muestra de aire.

Como en el caso del analizador de NO_x , por diferencia en el amplificador es posible medir la concentración de los hidrocarburos totales menos metano.

Analizador de polvo - Nefelómetro

Su funcionamiento se basa en la dispersión de un haz luminoso monocromático por partículas suspendidas en una muestra de aire ambiente. La medición del coeficiente de dispersión permite calcular la concentración de las partículas en la citada muestra y, por tanto, en el ambiente.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 101		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

El aire ambiente es aspirado continuamente por la toma muestra, recorriendo el tubo activado por la fuente luminosa, siendo expelido nuevamente al exterior por una bomba. Las partículas en suspensión contenidas en el aire producen difracción del haz de luz en todas las direcciones y en forma aleatoria, siendo captada la componente que forma un ángulo de 90° con el haz, por medio del tubo fotomultiplicador de medida. Este TFM y su circuito electrónico asociado, realizan un promedio de la señal captada y la compara con la amplitud de referencia dada por el TFM I₀ alineado con la fuente luminosa, obteniéndose una señal resultante proporcional al coeficiente total de dispersión (Scattering) de la muestra analizada en ese instante, o su equivalente en concentración de partículas en mgr/m³.

Radiación Beta

Es este un método recientemente introducido en analizadores comerciales, basando su funcionamiento en la absorción parcial de la radiación beta proveniente de una fuente de gran estabilidad, al atravesar un papel filtro de fibra de vidrio, donde quedan depositadas las partículas en suspensión arrastradas por la muestra de aire ambiente, independiente de su composición química, se obtiene a partir de la medición del volumen de la muestra y la masa o cantidad de partículas depositadas en un intervalo de tiempo fijado, valor éste obtenido por la atenuación de la radiación beta a partir de un contador Geiger Muller ubicado colindante con el eje principal de la fuente emisora.

Considerando una distribución homogénea de las partículas sobre la superficie del filtro, es posible relacionar la masa depositada con el número de impulsos detectados y contados electrónicamente en el contador Geiger Muller, antes y después de la colección de materia en suspensión, siendo :

- N : N° de impulsos contados con el filtro manchado.
- N₀ : N° de impulsos contados con el filtro limpio.
- m : la masa de materia depositada.
- n : Coeficiente de atenuación lineal de la radiación beta.
- k : Constante física del equipo de medida.
- A : Actividad de la fuente emisora.

Puede escribirse así la expresión que relaciona el factor de absorción beta con los parámetros del sistema :

$$\frac{N}{N_0} = e^{-ku}$$

y, consecuentemente, la relación entre la masa m de materia depositada absorbente y el número de cuentas medido por el detector antes y después de la colección de materia :

$$m = \frac{A}{K} (\ln N_0 - \ln N)$$

donde $\frac{A}{K}$ es el coeficiente total de atenuación con dimensión µgr de la masa depositada, prácticamente independiente de la composición química del polvo contenido en la muestra.

En esta forma, y desde el punto de vista instrumental, la diferencia en tiempo entre la cuenta de los impulsos con y sin materia depositada, medido con gran precisión es directamente proporcional a la masa colectada en el filtro. Conocido el volumen de aire muestreado, se obtiene finalmente la concentración de las partículas en µgr/m³.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 102		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	7	CAPITULO : TECNICAS ANALITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.	01	10	80

El esquema es similar al anterior reemplazándose la fuente luminosa y detector de opacidad por la fuente de radiación beta y el detector Geiger-Muller seguido de amplificador y circuito de registro o teletransmisión. La calibración de plena escala se realiza intercalando entre fuente y detector un material con un coeficiente de absorción conocido, mientras que para el cero, se debe introducir aire puro.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 103		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	8	CAPITULO : PROCESOS Y SISTEMAS DE CONTROL, RENDIMIENTO SELECCION Y APLICACION DE COLECTORES.	01	10	80

8.1. INTRODUCCION

El objeto de este capítulo es tratar de los aspectos industriales del control de los residuos gaseosos industriales como solución a los problemas de contaminación atmosférica.

Sabido es que las industrias representan sólo una parte de la totalidad del problema, sin embargo, gastan - actualmente, y gastarán en el futuro, una parte importante de las inversiones en el control, presentando - problemas mucho más complejos en su solución que los derivados de actividades contaminantes mayoritarias. Además, cada proceso produce residuos inherentes al mismo y, a veces, en grandes plantas de proceso, se producen cientos de problemas particulares que deben resolverse individualmente para cumplir con los requisitos legales.

Las soluciones pueden variar desde una simple operación en una sólo etapa, a sistemas de proceso en etapas múltiples. En la mayoría de los casos, la ingeniería de procesos puede abordar soluciones sin grandes dificultades.

¿Cuáles son las herramientas básicas necesarias?. Simplemente la serie de operaciones unitarias que se han desarrollado para la solución de los problemas complejos de proceso en la Ingeniería Química.

Muchas de estas operaciones han formado parte de la carrera de Ingeniería en Universidades en los últimos 50 años, algunas de ellas son nuevas en su concepción, y otras, se desarrollarán en el futuro.

Lo importante, en primer lugar, es hacer una evaluación de todos los parámetros que afectan al diseño: - flujos, temperaturas, presiones, concentraciones, densidad, viscosidad, conductividad térmica y otras - propiedades físicas del efluente. Este es el primer paso: conocer las características del efluente.

En segundo lugar, viene una puesta al día de los equipos y operaciones de más reciente desarrollo. Con - ello, se estará en condiciones de abordar el diseño de los sistemas necesarios para cumplir las especificaciones legales.

El problema debe tratarse siempre de manera similar a como si fuera cualquier otro problema de diseño - de procesos.

En esta parte, nos ceñiremos a aquellos equipos y operaciones más singulares, cuyo tratamiento, no está normalmente incluido en libros de texto.

8.2. CONSIDERACIONES ECONOMICAS

Uno de los aspectos fundamentales en la selección del equipo más apropiado a cada problema, viene dado - por consideraciones económicas.

Esto puede parecer una utopía, puesto que el cumplimiento de la legislación, debe venir impuesto a pesar - de las cuestiones económicas. Sin embargo, la conciencia de coste económico en Ingeniería y Gestión, debe hacernos trabajar en pro de la solución más satisfactoria y económica posible.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./104		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	8	CAPITULO: PROCESOS Y SISTEMAS DE CONTROL. RENDIMIENTO, SELECCION Y APLICACION DE COLECTORES.	01	10	80

Aunque no exista un concepto de "pay-out" (amortización del equipo), sería ingenuo el no plantearse la solución más económica entre diversas posibilidades.

A pesar de ello, nunca se debe eliminar "a priori" la posibilidad de un "pay-out" en cualquier problema de control de efluentes atmosféricos.

A menudo, es mucho más fácil suponer que una incineración o una dilución directa del contaminante es la solución más económica. Estas soluciones pueden despreciar el valor económico de la recuperación de los componentes del efluente para su reciclado o, incluso, su venta directa o después de una técnica de reproceso.

Ello no significa que el material recuperado vaya a pagar el sistema de reproceso, lo que es raro que ocurra, significa, simplemente, que puede compararse, quizás ventajosamente, con su deposición directa, de forma que los costes anuales fijos y de operación sean menores.

Esto, a veces, no implica el que los propios fabricantes hayan de reprocesar sus efluentes, pues existen posibilidades de que pequeñas compañías estén interesadas en su aprovechamiento, incluso como materias primas de otros procesos.

Sobre esta base evidente, el primer paso en la evaluación de cualquier efluente industrial, es el de considerar su posible reutilización o venta, tanto del efluente, como de sus componentes.

8.3. SEPARACION DE EFLUENTES

Este es el siguiente paso, olvidado frecuentemente por muchos industriales.

Los efluentes gaseosos, pueden arrastrar líquidos y sólidos, los cuales deben de eliminarse del efluente principal, dando lugar a una división en efluentes sólidos, líquidos y gaseosos, a partir de los cuales se puede plantear un diagrama de proceso con las operaciones unitarias necesarias.

Los efluentes gaseosos, suelen emitirse continuamente aunque en ocasiones se emiten de forma intermitente. No resulta práctico en este último caso, almacenar los gases antes de su tratamiento, puesto que requeriría su compresión a altas presiones con los costes consiguientes. Por ello, el equipo debe ser capaz de manejar el caudal volumétrico máximo en las condiciones de presión de descarga sobre una base continua.

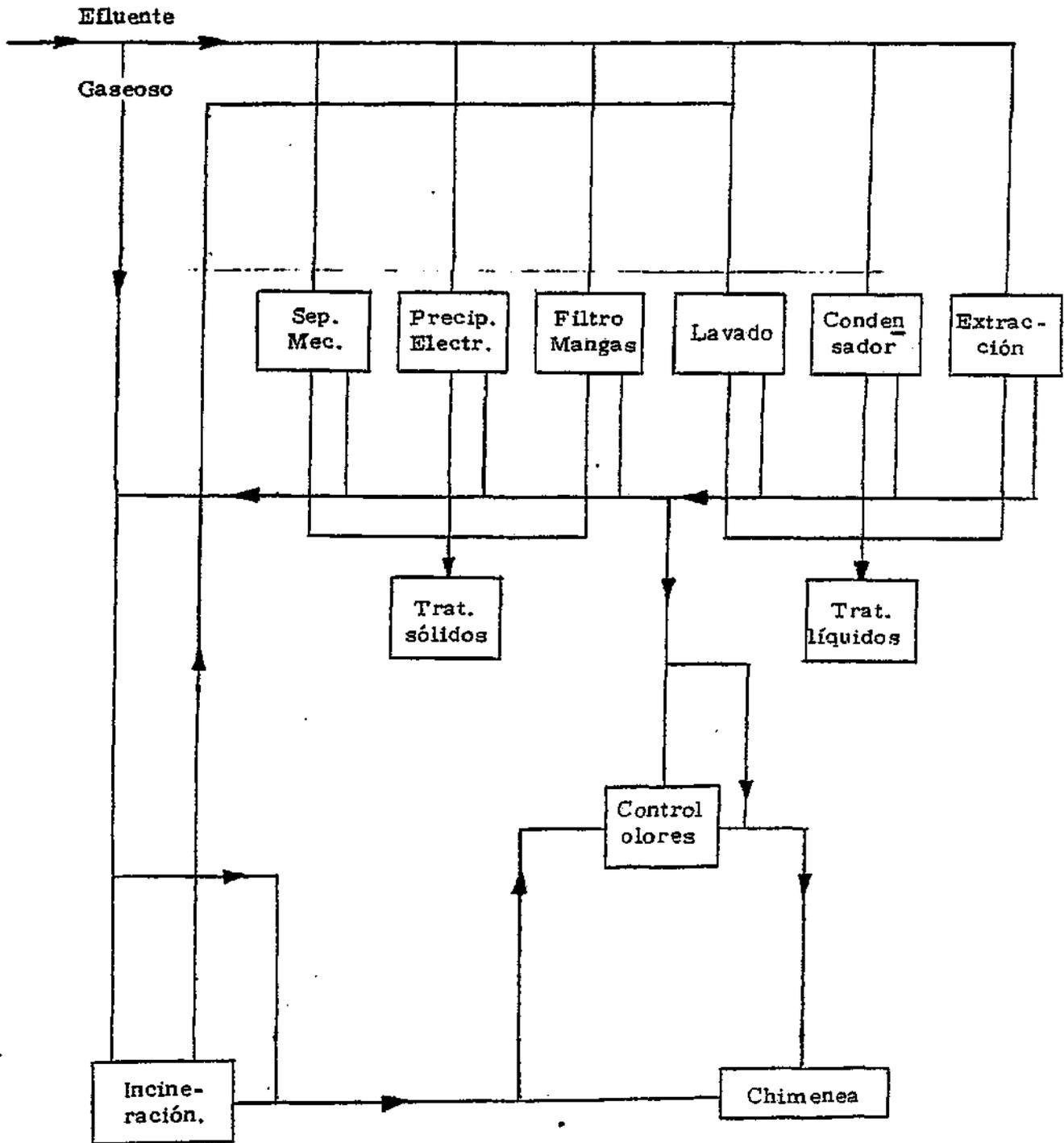
Si el efluente gaseoso contiene sólidos, y especialmente si éstos no son combustibles, deben de considerarse los métodos de recuperación a base de separación mecánica, precipitación electrostática y lavado en scrubbers con líquidos apropiados.

Si el efluente contiene líquidos o vapores, deben de recuperarse mediante condensación o mediante extracción con carbón activo o disolvente.

En este último caso se tratará de dos efluentes, uno gas y otro líquido. Si el gas cumple con las especificaciones de legislación, podrá descargarse directamente, de lo contrario, proseguirá el esquema de tratamiento de gases.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./105.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	8	CAPITULO: PROCESOS Y SISTEMAS DE CONTROL. RENDIMIENTO, SELECCION Y APLICACION DE COLECTORES	01	10	80

Si el gas es combustible, la incineración directa será, en general, el mejor método. Después de la incineración pueden quedar sólidos arrastrados que requerirían el tratamiento ya expuesto. El tratamiento mediante incineración de un gas combustible con sólidos, es de elevado peligro de explosión. Se trata, finalmente, de descargar un gas a la atmósfera, libre de materia particulada, sin olor, color o elementos tóxicos, lo que a veces requiere su dilución.



Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 196		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	3	CAPITULO : PROCESOS Y SISTEMAS DE CONTROL. RENDIMIENTO SELECCION Y APLICACION DE COLECTORES	01	10	80

8.4. CONTROL POR METODOS MECANICOS

Nos interesa especialmente, analizar las siguientes categorías de contaminantes :

- Polvo : Materia particulada de 1 a 43 μ (325 Mesh)
- Humos o aerosoles : Partículas o coloides con diámetro inferior a 1 μ
- Gases.

Alguno de los contaminantes más frecuentes, con indicación de la categoría, se da a continuación :

Caliza	Polvo	1 - 50 μ
Cenizas	Polvo	0,5 - 50 μ
Pigmentos		
Pintura	Polvo	0,5 - 10 μ
Oxido zinc	Humo	0,01 - 0,5 μ
Cloruro Aluminio	Humo	0,1 - 1,0 μ
Humos de Aceite	Humo	0,05 - 1,0 μ
Cloro	Gas	
SO ₂	Gas	
SH ₂	Gas	

Esta clasificación, obedece al grado de dificultad de su depuración por los diferentes equipos de control.

A medida que el tamaño decrece, tanto el diseño es más difícil, como, en general, hace falta mayor potencia en el equipo.

Para grandes partículas, es suficiente con un ciclón y para humos y gases, se requiere sucesivamente, la precipitación electrostática, la filtración o el lavado.

La selección de cada equipo depende no sólo de las características particuladas del efluente, sino también del posible aprovechamiento de éste.

En plantas de MAP, la reacción del ácido y amoníaco, produce cantidades considerables de amoníaco gaseoso, junto con partículas de MAP que arrastra. El mejor método es una colección húmeda y reciclo al proceso.

En plantas de energía que empleen carbón, hay gran cantidad de cenizas. La solución está más por un ciclón seguido o no de precipitador electrostático.

8.5. CONSIDERACIONES DE PROCESO

En base a lo anterior, es fundamental conocer si el efluente se puede recuperar o no, lo que va a decidir sobre el empleo de colectores húmedos o secos.

Si en el efluente gaseoso hay polvo, la solución más lógica es el lavado húmedo, siempre que el gas también sea contaminante. En el caso de una colección húmeda, si el líquido efluente de ésta no es aprovechable, de

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 107		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	8	CAPITULO : PROCESOS Y SISTEMAS DE CONTROL. RENDIMIENTO SELECCION Y APLICACION DE COLECTORES.	01	10	80

berá preverse su tratamiento.

En el tratamiento de gases a elevada temperatura, es frecuente la producción de plumas de vapor de agua, - cuya condensación es un método adecuado, no sólo para el control de la contaminación, sino también para recuperar calor en la planta.

Otras veces, en cambio, el gas es directamente aprovechable después de eliminar el polvo, en la planta, - bien desde el punto de vista del proceso, o por su contenido energético. En este caso, interesa la filtración del mismo.

En realidad, la línea de separación entre control de la contaminación atmosférica y el proceso, es muy estrecha, especialmente en el caso de los lavadores.

8.6. CAPACIDADES Y LIMITACIONES DE LOS EQUIPOS

8.6.1. Colectores Mecánicos

El ciclón es el colector mecánico de menos eficacia.

Su operación más eficaz, tiene lugar en el rango, de 44μ a 5μ .

dp (μ)	44	30	20	10	5	2
η %	99+	98	97	90	65	30

Por las características especiales de las cenizas de combustión, puede presentar una eficacia global para éstas, del 92%.

Además de esto, influye la densidad de las partículas obteniéndose mayor eficacia con partículas más densas para un mismo tamaño.

8.6.2. Precipitador Electrostático

Posee una alta capacidad de colección de partículas con elevada eficacia. Para las cenizas volantes, anteriormente tratadas, la eficacia puede llegar al 99,5 - 99,8%.

Cuando la carga de polvo puede ser muy grande, conviene situar un ciclón previo al precipitador.

La eficacia de colección mecánica puede ser del 96,5%, con lo que queda un 3,5% del cual el precipitador recoge el 98,5%, quedando en salida sólo el 0,05 %, por lo que la eficacia global sería del 99,95%.

8.6.3. Filtros de mangas

Su eficacia es del orden del 99% para tamaños desde $0,01 \mu$ a 45μ . El problema fundamental reside en la resistencia del medio filtrante y el tiempo de vibrado y descarga, para conseguir unas condiciones de filtración uniformes.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 108		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	8	CAPITULO : PROCESOS Y SISTEMAS DE CONTROL. RENDIMIENTO SELECCION Y APLICACION DE COLECTORES.	01	10	80

8.6.4. Lavadores

El rango de partículas que puede colectar, está entre $0,05 \mu$ y 10μ . Para partículas de tamaño pequeño, la energía necesaria es mayor y vendrá en general como aumento de la pérdida de carga del gas.

Para eficacias de tipo medio, 95% a 98%, la relación entre ΔP y d_p es como sigue :

$d_p (\mu)$	5	2-5	1-2	0,1-1
$\Delta P ("H_2O)$	3	4-6	6-10	10 - 30

Esta pérdida de carga y consumo energético, ha de aumentar considerablemente si se quiere mayor eficacia y si las partículas son de menor tamaño.

Los lavadores son el único equipo que emplea una segunda corriente que es la del líquido de lavado, pudiendo aprovecharse esta circunstancia para que el principio de operación varíe entre retención de partículas, absorción, transferencia de calor, condensación y reacción química, combinando en el mismo equipo todas estas operaciones unitarias. Por ello, los lavadores "scrubbers", constituyen uno de los equipos más empleados en la industria química.

8.7. COSTES DE INVERSION Y OPERACION

Los costes de inversión y operación para los cuatro tipos de equipos varían considerablemente.

Los costes de inversión conviene expresarlos desde un punto de vista comparativo, en \$/cfm de capacidad.

Para construcción en acero al carbono, y eficacias moderadas, los rangos de precio son :

	S/cfm (1977)	1979 pts/m ³ /s . 1000
Ciclón simple	0,1 a 0,30	13 a 40
Ciclón múltiple	0,3 a 0,50	40 a 65
Precipitador Elect.	1,6 a 2,50	210 a 325
Filtro de mangas	2,5 a 3,0	325 a 390
Lavadores "scrubbers"	0,6 a 1,0	80 a 130

Estos precios están basados en flujos medios, de unas 100.000 cfm para precipitadores electrostáticos, y 10.000 cfm para los restantes. También están considerados unos rendimientos moderados, que en el caso del precipitador electrostático es de 98,5%. Si se requiriera una eficacia mayor, por ejemplo 99,5%, entonces el precio podría subir del orden de 1,8 \$/cfm.

Estos precios son de los equipos como tales, la instalación puede suponer hasta un 30% más.

Los costes de operación, comprenden fundamentalmente, los costes de energía necesarios para vencer la ΔP (pérdida de carga). Además de ello, para los precipitadores electrostáticos, hay que incluir los costes de energía eléctrica necesarios.

Para los lavadores, los costes de operación comprenden los necesarios para impulsar el gas y el líquido a veces ésta último es más importante, cuando existen boquillas de dispersión.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 109		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	8	CAPITULO : PROCESOS Y SISTEMAS DE CONTROL. RENDIMIENTO SELECCION Y APLICACION DE COLECTORES.	01	10	80

En la tabla que sigue se expresan las pérdidas de carga media del gas, junto con la potencia equivalente para 10.000 cfm de capacidad.

	AP	HP
Colector mecánico	1 - 3	2,6 - 8
Precipitador Electrostático	0,2 - 0,5	0,5 - 1,3
Filtro de mangas	1,0 - 4,0	2,6 - 10,4
Lavadores "Scrubbers"	2,0 - 10,0	5,2 - 26,0

Para precipitadores electrostáticos, se requiere además, 2,5 Hp/10.000 cfm para producir el campo eléctrico.

La pérdida de carga para lavadores, se ha tomado para partículas entre 1 y 5 μ , es decir, con eficacia moderada.

3.8. OTROS EQUIPOS PARA CONTROL DE LA CONTAMINACION

Tratamos en este punto especialmente, los condensadores y la adsorción con Carbón Activo, dejando para último punto, la incineración.

3.8.1. Condensadores

Se han empleado diversos tipos de condensadores, combinando incluso con compresores para recuperar los vapores condensables de gases portadores e, incluso, para licuar estos gases. En general, su empleo representa un coste adicional elevado.

Si el problema requiere la condensación de un vapor puro, entonces el condensador suele ser una parte integral del proceso, y no se considera un equipo de recuperación.

Cuando la proporción de gas portador es baja, puede no resultar práctica la condensación, porque la temperatura del gas ha de reducirse al punto de rocío del disolvente en el gas.

Conforme se elimina el vapor, baja el punto de rocío, lo que hace imposible una recuperación del 100%.

Además los equipos de transferencia de calor se hacen progresivamente crecientes en tamaño, como consecuencia del bajo coeficiente de transmisión G-L.

La condensación debe de considerarse como posibilidad únicamente con elevada concentración de vapores en el gas portador.

3.8.2. Adsorción en Carbón Activado

Los carbones activos comerciales tienen superficies de 600 a 1.200 m²/gr. con volúmenes de poros de 0,6 a 1 cc/gr, lo que indica que 1 kg de carbón activo, tiene una superficie equivalente a 120 Hectáreas.

Existen dos tipos fundamentales, según se trate de recuperar impurezas de una disolución (contacto S-L) o

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 110		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	8	CAPITULO : PROCESOS Y SISTEMAS DE CONTROL. RENDIMIENTO SELECCION Y APLICACION DE COLECTORES.	01	10	80

contaminantes gaseosos y vapores condensables.(contacto G-L). La diferencia estriba en la distribución de tamaño de poros.

Para fase Vapor, que es nuestro interés, el equipo puede consistir de un lecho fijo de carbón activo, a través del cual se hace pasar el gas. Cuando comienza a aparecer vapores de disolvente en el gas portador, es que el c.a. está saturado. Entonces se regenera con vapor de agua, que arrastra el disolvente, condensándose la mezcla para posterior reparación. De esta forma, se tratan hidrocarburos, hidrocarburos clorados, alcoholes, ésteres, cetones, éteres y compuestos aromáticos, además de éstos, muchos compuestos sulfurados en general.

Otros procesos más actuales incluyen el funcionamiento en lecho fluido y con regeneración continua, si bien las especificaciones de fragilidad deben ser mucho más exigentes.

Las variables fundamentales que afectan el funcionamiento de estos lechos son :

a) Tamaño de partículas del adsorbente.

Afectan positivamente a la transferencia de masa y negativamente a la pérdida de carga. Los tamaños normales son 4 x 10 mesh, 6 x 16 mesh y 12 x 30 mesh.

b) La velocidad superficial lineal.

Afecta a la pérdida de carga y al arrastre de carbón activo por erosión y partición. Valores normales en el orden de 50 ft/min y máximo de 100 ft/min.

c) Disposición del equipo.

Debe ser vertical para pequeñas cargas y bajos valores de ΔP .

Para valores elevados, es aconsejable emplear depósitos horizontales.

d) Regeneración.

El consumo de vapor varía de 1 a 4 kg. de vapor/kg de disolvente tratado.

Debe de tratarse con flujo inverso al del disolvente.

El aire empleado en secar el carbón no debe ser completo, permitiendo cierta humedad final.

Debe ponerse especial cuidado cuando existe posibilidad de oxidación, polimerización o descomposición.

En cualquier caso, no debe de sobrepasarse el 30% del LEL, ni llegar a la temperatura de autoignición del disolvente.

8.9. INCINERACION DE GASES

Realmente, se considera aquí tanto su combustión directa, como la incineración catalítica.

Conviene considerar la posibilidad de destruir ciertos componentes tóxicos: $2 \text{HCN} + 2 \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2, / 111		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	8	CAPITULO : PROCESOS Y SISTEMAS DE CONTROL. RENDIMIENTO SELECCION Y APLICACION DE COLECTORES.	01	10	80

8.9.1. Consideraciones de Diseño

Los factores a considerar son :

Tipo de efluente	Gas, con sólidos o líquidos.
Análisis Elemental	C, H, O, N, H ₂ O, S y Cenizas.
Contaminantes	Ca, Na, Cu, V, Br ⁻ , Cl ⁻ o F ⁻
Poder Calorífico	kcal/kg.
Sólidos	Cantidad y Tamaño.
Gases	Densidad e Impurezas, P y T.
Propiedades	Toxicidad, Corrosividad.

Si no existen contaminantes, especialmente metales o halógenos, el problema es de una simple combustión.

Las variables fundamentales son : Tiempo, Temperatura y Turbulencia.

El tiempo y la turbulencia son variables de diseño, la temperatura se puede controlar.

El control de temperatura, se realiza por la proporción aire/fuel.

La temperatura mínima para que un sólido carbonoso arda sin humos, es de 1400°F (800°C) y el límite inferior está dado por el refractario en 2400°F (1400°C). Lo normal es operar a temperaturas entre 1000°C a 1100°C.

Para el control de la temperatura hay cuatro métodos básicos:

- Exceso de aire.
- Transmisión de calor radiante.
- Combustión en dos etapas.
- Transferencia de calor directo.

El tiempo y la turbulencia vienen dados por el diseño de la cámara de combustión y el quemador.

La turbulencia se suele medir en términos del mínimo exceso de aire para combustión sin humos. Si éste es 15%, entonces $T = \frac{100}{115} = 87\%$. Para gases suele ser 100%.

En ausencia de datos, el tiempo debe ser tal que se obtenga una capacidad de 20.000 a 60.000 Btu/ft³.

Cuando existen fenómenos, SO₂, cenizas u óxidos metálicos, conviene realizar un lavado posterior y una dispersión incrementando la altura de chimenea.

El NO₂ se puede reducir elevando la temperatura (1800°F) y con exceso de aire (20%) : $\text{NO}_2 \rightarrow 1/2 \text{O}_2 + \text{NO}$ (deficiencia de O₂).

Con esto sólo se consigue decolorar pasando a NO. Después en la atmósfera ocurre la reacción inversa.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 112		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. M I N E R	8	CAPITULO : PROCESOS Y SISTEMAS DE CONTROL. RENDIMIENTO SELECCION Y APLICACION DE COLECTORES.	01	10	80

El combustible a emplear en este caso puede ser, H_2 , CO , CH_4 , C_3 , Hcarburos, queroseno, pero hay que tener en cuenta la temperatura mínima de ignición (2009F para H_2 , 8509F para CH_4) y añadir la cantidad mínima imprescindible para decolorar.

Quando hay que reducir todo el NO_x hay que quemar más fuel y más alta temperatura para pasarlo a N_2 y H_2O . También es posible reducirlo con NH_3 : $8NH_3 + 6NO_2 \rightarrow 7N_2 + 12H_2O$.

8.9.2. Incineración Catalítica

Consiste en una combustión a baja temperatura con un catalizador selectivo (5009F).

Se aplica a efluentes gaseosos con contaminantes orgánicos (hidrocarburos, alcoholes, aminas, ácidos, ésteres, aldehídos...). Uno de los factores importantes es que la pérdida de carga debe ser muy baja, empleándose en general, catalizadores a base de soporte en malla (Honey Comb).

Otro factor es que la temperatura de operación debe mantenerse, en general, por debajo de 16009F.

La eficacia suele medirse en términos de la concentración de contaminantes en salida: (ppm a la salida).

de 10.000 ppm a 100 ppm	99%
de 500 ppm a 100 ppm	80%

dado que si se considera globalmente no da suficiente información.

Las consideraciones económicas, deben decidir en cada caso, la conveniencia del incinerador directo o catalítico, pues éste último consume menos fuel.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2 / 113		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD.	01	10	80

9.1. INTRODUCCION

Antes de pasar al estudio de los equipos de separación de contaminantes sólidos, desde una corriente de gases, es conveniente el entendimiento de las relaciones y esfuerzos entre las partículas sólidas y la corriente de gases donde están suspendidos.

Esencialmente, un equipo de separación no es nada más que un sistema por donde circula la corriente de gases a su través, mientras que las partículas accionadas por fuerzas de cualquier tipo, abandonan la corriente de gas. El sistema de separación será efectivo si las fuerzas que actúan sobre las partículas son suficientes para separarlas de la corriente de gases en el tiempo de residencia que están en el equipo. Las fuerzas actuantes dan a las partículas una componente de velocidad, en una dirección distinta que la de los gases y, en su movimiento a través de las líneas de corriente, las partículas encuentran la resistencia del gas a su movimiento.

El movimiento de partículas en el seno de fluidos que también se mueven, no está extensamente estudiado, de aquí que el estudio se haga suponiendo que la resistencia al movimiento del fluido, es la misma que la que presentarían las partículas en el interior de un fluido que permanece estacionario.

Los esfuerzos ejercidos por un fluido sobre un sólido, cuando existe movimiento relativo entre ambos, tienen un doble origen: la densidad del fluido que produce esfuerzo de presión sobre la superficie del sólido en dirección normal a ésta en cada punto, y la viscosidad que origina esfuerzos cortantes en dirección tangencial. Independientemente del fluido, también actúan sobre el sólido las fuerzas de inercia y las de gravedad, en ambos casos, con magnitudes proporcionales a su masa.

Si el sólido permanece en reposo con respecto del fluido, la resultante de todas las presiones estáticas sobre su superficie, da lugar a un esfuerzo vertical ascendente igual al peso del volumen de fluido desplazado por el sólido. Esta resultante se conoce con el nombre de Empuje de Arquímedes. Cuando el cuerpo sólido se mueve, las presiones existentes en cada punto son la suma algebraica de las presiones estáticas (ya consideradas en el empuje de Arquímedes) y de las dinámicas originadas en el movimiento relativo entre sólido y fluido. Estas últimas, junto con los esfuerzos cortantes debidos a la viscosidad, deben ser integrados a lo largo de toda la superficie del sólido para obtener sus resultantes. Para ello, se las descompone, generalmente, en dos direcciones perpendiculares: la del movimiento y la normal a éste. Integrando cada componente por separado, a la componente de la resultante según el movimiento se la denomina Resistencia y a la normal al movimiento Empuje normal. Esta última origina una aceleración normal que desvía la dirección del movimiento y la primera, una deceleración tangencial.

Tanto la Resistencia "R", como el Empuje "E", se expresan normalmente en función de la energía cinética específica del fluido, mediante unos coeficientes adimensionales C_D y C_L , denominados coeficientes de resistencia y de empuje, respectivamente :

$$R = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2} \qquad E = C_L \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2} \qquad (1)$$

siendo ρ la densidad del fluido en kg/cm^3 , A , el área de la sección normal de la partícula a la dirección del movimiento, y u , la velocidad relativa existente entre sólido y fluido.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 114		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A.		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD.	01	10	80

El valor numérico de estos coeficientes, depende, por una parte, de la densidad y viscosidad del fluido y, por otra, de la forma y tamaño de la partícula del sólido y, además, de la velocidad relativa entre ambos.

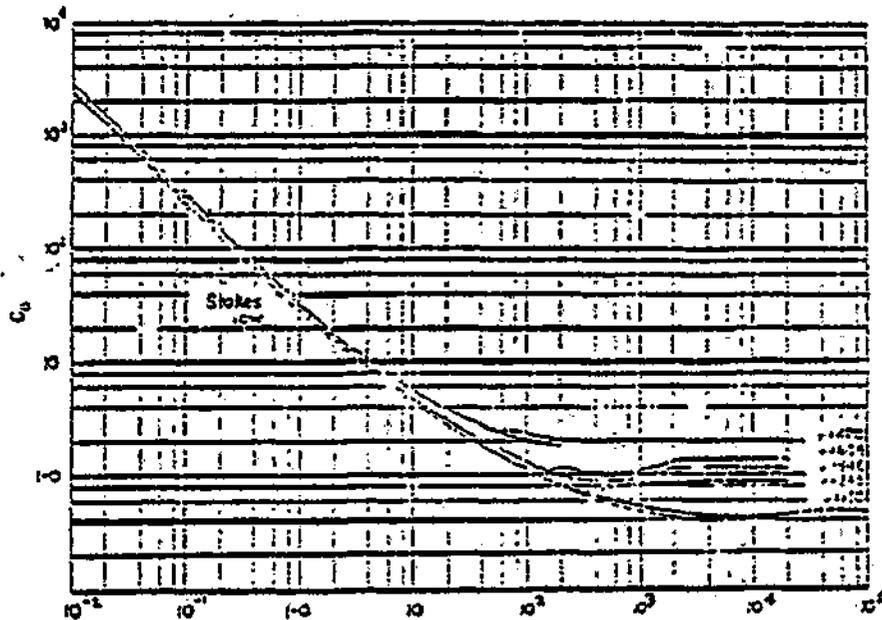
El análisis dimensional indica que para cada forma de las partículas del sólido, ambos son función del número de Reynolds, usando como dimensión característica del tamaño, una cierta longitud que llamaremos "diámetro de la partícula",

$$C = f(Re_p)$$

siendo

$$Re_p = \frac{\rho u D_0}{\mu} \quad (2)$$

ρ y μ la densidad y la viscosidad del fluido.



$$Re = \frac{\rho u D_0}{\mu}$$

Figura. - 2.9.1.

Analizando la Figura 2.9.1., observamos la existencia de cuatro zonas perfectamente diferenciadas.

Desde el origen, hasta el número de Reynolds 0,3, se observa la linealidad de la relación $C = f(Re_p)$ en la escala logarítmica.

Esta relación ya fue calculada por Stokes en el año 1851, mediante consideraciones puramente teóricas aplicadas a esferas, obteniendo :

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (3)$$

siendo el valor de la fuerza de resistencia :

$$R = \frac{24}{Re} A \frac{\rho u^2}{2g} = \frac{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot D \cdot u}{g}$$

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 115		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD.	01	10	80

Los datos experimentales representados en la Figura, confirman la validez de esta ley hasta números de Reynolds próximos a la unidad.

En este intervalo, para un diámetro determinado de las esferas, las velocidades son tan pequeñas, que la única componente importante de la resistencia al movimiento, es la resistencia viscosa debida al rozamiento peculiar.

Para el intervalo entre $0,4 < Re < 500$, se observa una Zona de Transición en la que, al aumentar la velocidad, la resistencia de forma aumenta rápidamente (mucho más deprisa que la resistencia viscosa), llegando a preponderar en la composición de la resultante de la resistencia total.

Existen varias expresiones analíticas del valor del coeficiente de resistencia para esta zona, todas ellas empíricas y aproximadas. Entre ellas, se suele utilizar la siguiente :

$$C_D = 10/Re^{1/2} \quad (4)$$

Para número de Reynolds comprendido entre 500 y 200.000, cuando tiene lugar la separación todavía dentro de la capa límite laminar aparece la llamada zona de la Ley de Newton, existiendo una preponderancia total de la fuerza de resistencia de forma. Para este intervalo, el valor del coeficiente de forma C_D , permanece prácticamente constante y con un valor próximo a 0,43

$$C_D = 0,43 \quad (5)$$

la resistencia total vale

$$R = 0,43 \cdot \rho \cdot A \frac{u^2}{2g}$$

Para valores de números de Reynolds superiores a 200.000, la separación se produce cuando la capa límite se encuentra en régimen turbulento. En este caso, el valor del coeficiente de resistencia, disminuye bruscamente hasta un valor aproximadamente constante e igual a 0,1.

$$C_D = 0,1 \quad (6)$$

la resistencia total vale :

$$R = 0,1 \cdot \rho \cdot A \frac{u^2}{2g}$$

Si consideramos una esfera rígida que en el seno de un fluido está sometida a fuerzas de masa (gravedad) y de inercia (centrífugas), se establecerá un equilibrio dinámico cuando la esfera haya alcanzado una cierta velocidad denominada "velocidad límite" o terminal, a la cual, la fuerza de resistencia que ha ido aumentando - proporcionalmente al cuadrado de la velocidad, anula a las fuerzas gravitacionales y de inercia. A partir de este instante, el movimiento de la esfera se hace uniforme.

Si el movimiento es unidimensional y vertical y los esfuerzos sobre la esfera son únicamente los producidos por la gravedad y por el empuje de Arquímedes, se verifica que :

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 116		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

$$P - E = R$$

$$(\rho_s - \rho) V = C_D A \cdot \frac{u_t^2}{2g}$$

siendo :

V = Volumen de la esfera $\frac{1}{6} \pi D^3$.

A = Area de la sección proyectada en la dirección del movimiento $\pi D^2/4$.

u_t = Velocidad terminal.

sustituyendo V y A en función de D

$$\frac{1}{6} \pi D^3 (\rho_s - \rho) = C_D \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \rho \cdot \frac{u_t^2}{2g}$$

$$u_t^2 = \frac{4gD(\rho_s - \rho)}{3\rho C_D} \quad (7)$$

sustituyendo los valores de C_D , según el número de Reynolds para el cual llega a establecerse el equilibrio resulta:

- Para la región de Stokes ($Re < 0,4$)

$$u_t = \frac{gD^2(\rho_s - \rho)}{18\mu} \quad (8)$$

- Para la región de transición ($0,4 < Re < 550$)

$$u_t = \left[\frac{4}{225} \cdot \frac{(\rho_s - \rho)^2 g^2}{\rho \cdot \mu} \right]^{1/3} \quad (9)$$

- Para la región de Newton ($500 < Re < 200.000$)

$$u_t = \left[\frac{3,1g(\rho_s - \rho)D}{\rho} \right]^{1/2} \quad (10)$$

El estudio realizado hasta ahora, es puramente teórico, ya que en pocas situaciones las partículas son totalmente esféricas. Se hace necesario pues, acomodar las exposiciones anteriores para partículas de cualquier estructura geométrica.

Para ello, se emplea el concepto de Esfericidad ϕ_s definida como la relación entre el área de la esfera de igual volumen que la partícula y el área de la partícula :

$$\phi_s = \frac{D_m}{D_s n} \quad (11)$$

n = Relación entre las superficies específicas de la partícula y de la esfera de igual diámetro . a $\rho D_m/6$.

D_m = Tamaño medio de la malla del tamiz.

D_s = Diámetro equivalente (diámetro de la esfera de igual volumen que la partícula).

La superficie específica de la partícula a_p (Relación entre su superficie y su volumen) se puede expresar como :

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 117		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

$$a_p = \frac{6n}{D_m} \quad \text{puesto que } \phi_s = \frac{D_m}{D_s a}$$

$$a_p = \frac{6}{\phi_s D_s} \quad (12)$$

El término $\phi_s D_s$, es fundamental para el tratamiento de partículas no esféricas, pudiéndose considerar como un parámetro definitorio del tamaño y forma de la partícula. En todas las exposiciones utilizadas hasta ahora hemos de sustituir el término D_p (diámetro de la partícula) por el de D_s (diámetro equivalente).

Los factores de resistencia C_D vendrá asimismo influenciado por la forma de la partícula, de tal modo que, para cada caso particular de ϕ_s , Waddel y Hakon han obtenido dichos factores, recogidos en la Figura - 2.9.1. los correspondientes a discos, esferas y cilindros.

En la práctica, no sólo las partículas no son esféricas, sino que tampoco el fluido es infinito, y además, el movimiento de una partícula interfiere con las vecinas.

La primera limitación denominada "efecto de pared", puede tener importancia cuando la sección transversal del recipiente es relativamente pequeña.

La Tabla 2.9.1. y la fórmula (13), dan los coeficientes de corrección k_w a introducir en función de la relación entre los diámetros de la partícula y del recipiente.

TABLA 2.9.1.

Factor de corrección del efecto de pared para partículas rígidas en la región de la ley de Stokes.

$$\beta = \frac{\text{diámetro de la partícula}}{\text{diámetro del recipiente}}$$

β	k_w	β	k_w
0,0	1,000	0,5	0,170
0,1	0,792	0,6	0,0945
0,2	0,596	0,7	0,0468
0,3	0,422	0,8	0,0205
0,4	0,279		

(Según Halerman y Sagre 1.958)

Para la zona de Newton, se admite la aplicación de la expresión debida a Monroe

$$K_w = 1 - \beta^{1,5}$$

La segunda limitación por interferencia de unas partículas con otras, tiene mayor interés en el caso de que el fluido sea un líquido. Para corregir esta interferencia, Brown propone sustituir la viscosidad y densidad

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2 / 118		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

del líquido por otras superiores. Estas correcciones no son necesarias si la concentración del sólido es inferior al 0,1% en volumen.

Para valores superiores de la concentración, se admite el empleo de la fórmula (13).

$$u_{tm} = u_t (1 - c)^B \quad (13)$$

u_{tm} = velocidad real de sedimentación.

u_t = velocidad teórica.

c = concentración en volumen de sólidos.

B = coeficiente que para partículas esféricas puede obtenerse de la Tabla 2.9.2., en función del número de Reynolds. Para partículas no esféricas B , suele ser 1,5 veces superior.

TABLA 2.9.2.

Valores del coeficiente B

Re	B	Re	B
10^{-2}	4,6	10^2	3,1
10^{-1}	4,5	10^3	2,5
1	4,2	10^4	2,3
10	3,6	10^5	2,3

Quando se trata de partículas muy pequeñas suspendidas en un gas, partículas cuyo tamaño es próximo al recorrido libre medio de las moléculas del gas, la velocidad de sedimentación de las mismas, es superior a la calculada teóricamente por estar sometidos a una especie de bombardeo molecular, que origina el movimiento Browniano. En este caso, habrá que corregir la fuerza de resistencia con un coeficiente llamado coeficiente de deslizamiento o de Cunningham. El valor de este coeficiente, obtenido en principio por Cunningham y modificado después por Davis para la región viscosa, es :

$$C = 1 + \frac{2\lambda}{d} (1,257 + 0,4 e^{-1,10 d/2\lambda}) \quad (14)$$

c = factor de corrección de Cunningham.

λ = recorrido libre medio de las moléculas del gas, basado en la ecuación de Chapman-Enskog

$$\lambda = \frac{\mu}{0,499 \cdot \rho \cdot \bar{u}}$$

\bar{u} = velocidad molecular media

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

T = temperatura absoluta

R = constante universal de gases.

M = peso molecular

La nueva ley de Stokes, queda afectada del factor C como la ley de Stokes-Cunningham.

$$F = \frac{3\pi\mu d u}{C} \quad (15)$$

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 119		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

El factor de deslizamiento C , es menor del 1% para partículas de 20μ de tamaño (densidad 1) en aire ambiente, alrededor del 5% para partículas de 5μ , un 16% para partículas de 1μ y más del 300%, para partículas de $0,1 \mu$.

9.2. GENERALIDADES

Las partículas suspendidas en el seno de un gas, poseen inercia, momentum y actúan sobre ellas las fuerzas de gravedad. Estas propiedades pueden usarse para crear sobre ellas fuerzas centrífugas que actúan sobre las partículas cuando a la corriente gaseosa se le fuerza a cambiar de dirección. La fuerza centrífuga es el mecanismo primario de separación de partículas en los colectores ciclónicos y en muchos tipos de colectores que se designan en general con el nombre de "colectores inerciales". La inercia de las partículas y la fuerza centrífuga, también juegan un papel importante en la filtración, en el scrubbing, etc, pero, además, en estos equipos de limpieza, actúan otras fuerzas distintas de las especificadas en este apartado.

El colector ciclónico es ampliamente usado, siendo su teoría la base de la mayoría de los separadores inerciales. El ciclón es un equipo simple, barato y sin partes en movimiento, pudiendo construirse con materiales de bajo coste. Si el problema de limpieza del gas no requiere una eficacia muy alta, los contaminantes no son muy tóxicos y son partículas de gran tamaño, el separador ciclónico es el equipo ideal para llevar a cabo la operación.

Del mismo modo, las fuerzas de gravedad hacen que las partículas, tanto líquidas como sólidas, sedimenten cuando se encuentran suspendidas en el seno de un gas. Las cámaras de sedimentación utilizan este mecanismo de separación para eliminar materia particulada de gran tamaño con el inconveniente de que precisan equipos de gran tamaño para la operación.

En el presente capítulo se van a estudiar los equipos de separación de materia particulada sólida, que aprovechan la fuerza de gravedad simplemente (cámaras de sedimentación) o la fuerza centrífuga sólo (ciclones) o la fuerza de impacto (impactadores), o una combinación de algunas de estas fuerzas, englobándose los equipos en el contexto general de "separadores inerciales".

El problema fundamental de estos equipos es el bajo rendimiento para su uso en la separación de materiales de muy pequeño tamaño (menores de 5μ) pudiendo establecerse éste como el límite más bajo de operación para los ciclones.

9.3. CAMARAS DE SEDIMENTACION POR GRAVEDAD

La sedimentación de las partículas de polvo arrastradas por los gases cuando el tamaño de las mismas es superior a unas 44 micras, se puede conseguir sin dificultad de forma continua, haciendo pasar el gas a través de unas cámaras vacías, generalmente paralelepípedicas de dimensiones suficientemente grandes para reducir la velocidad media del gas, de modo que su flujo a través de la cámara sea totalmente laminar (velocidad del orden de unos 10 pies por segundo). También pueden tener aplicación tales cámaras para la separación de partículas de hasta 10 micras de tamaño, pero con un rendimiento bastante más bajo, función de la densidad del material.

La mayoría de las veces, el gas se introduce por la parte inferior de una de las caras del paralelepípedo, a través de una ranura distribuidora, para salir por otra ranura dispuesta en la parte superior de la cara opuesta.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 120		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E. C. L. M. I. N. E. R.	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

La Figura 2.9.2., muestra esquemáticamente una cámara de sedimentación por gravedad.

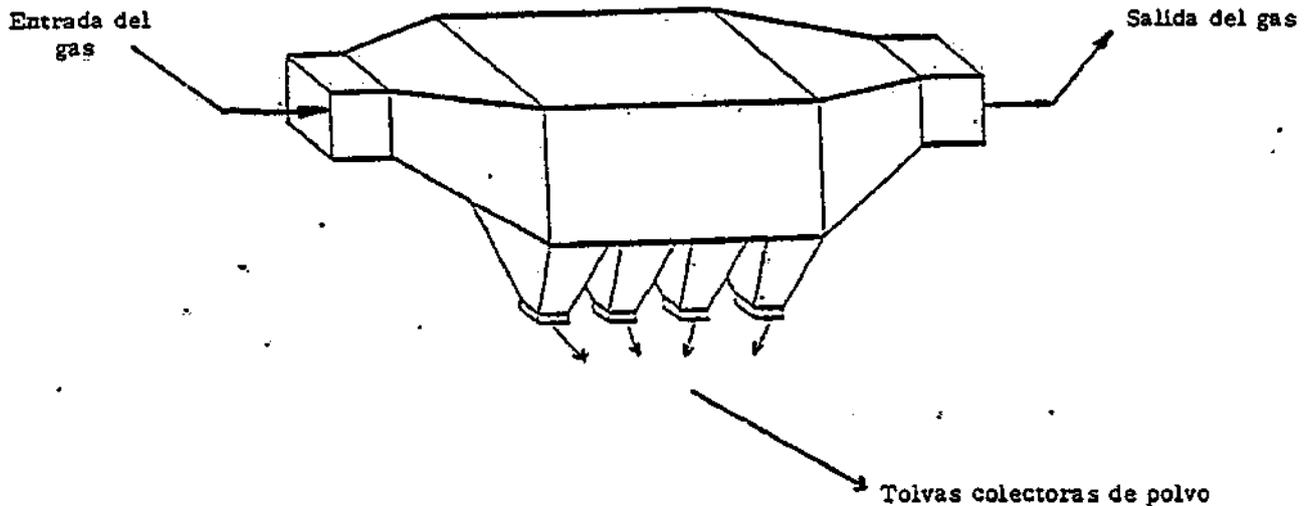


Figura. - 2.9.2.

9.3.1. Teoría

Considerando que la velocidad media del gas a través de la cámara V_g es constante, se verificará :

$$V_g = \frac{Q}{a \cdot b} = \frac{L}{t_L} \quad (16)$$

Q = caudal real del gas en $m^3/sg.$

a = altura de la cámara en metros.

b = anchura de la cámara en metros.

L = longitud de la cámara en metros.

t_L = tiempo de permanencia del gas en el interior de la cámara en segundos.

Se supone que cualquier partícula pequeña de polvo, es arrastrada por el gas con una velocidad horizontal y uniforme idéntica a V_g , a la vez que, debido a su peso, sedimenta con una velocidad uniforme en sentido vertical descendente " u_t ". Es decir, la trayectoria del movimiento resultante será una recta inclinada hacia el fondo y pared de salida de la cámara. Cuanto mayor sea u_t , tanto mayor será la posibilidad de que una partícula llegue al fondo y se ponga en contacto con otras partículas sólidas allí depositadas durante el tiempo t_L que teóricamente permanece en el interior de la cámara por término medio.

El caso más desfavorable será el de partículas muy pequeñas que sedimentan con muy pequeñas velocidades u_t (correspondientes al régimen de Stokes) desde las zonas más altas de la cámara. En tales condiciones, el tiempo que dura la sedimentación sería :

$$t_s = \frac{a}{u_t} \quad (17)$$

siendo :

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 121		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

$$u_t = \frac{g}{18} \frac{D^2 (\rho_s - \rho)}{\mu} \quad (\text{m/seg}) \quad (18)$$

a = la altura máxima de la cámara en metros.

El rendimiento de la cámara será función de la relación de los tiempos de permanencia del gas en la cámara y del tiempo que necesita una partícula para sedimentar :

$$\eta = 100 \times \frac{t_L}{t_s} = \frac{100 \cdot u_t \cdot L}{a \cdot v_g} \quad (19)$$

Las partículas para las que t_L iguala a t_s , sedimentan en su totalidad y se dice que la cámara tiene para ellas eficacia 100%.

Para calcular el tamaño mínimo de las partículas que sedimentan en su totalidad, se tiene que cumplir la igualdad $t_L = t_s$.

Despejando de las ecuaciones anteriores nos da :

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{18}{g} \frac{\mu}{\rho_s - \rho} \frac{Q}{b \cdot L}} \quad (20)$$

que como puede comprobarse, resulta independiente de la altura "a" de la cámara. Esta dimensión se fija en la práctica según el caudal de gases para conseguir que la velocidad no sea superior a 3 metros por segundo.

También se pone de manifiesto que cuanto mayor sea la temperatura del gas (mayor viscosidad), tanto mayor será D_{\min} y, por tanto, menor será la eficacia.

Si se disponen placas horizontales en el interior de la cámara, como se manifiesta en la Figura 2.9.3., se reduce la distancia vertical,

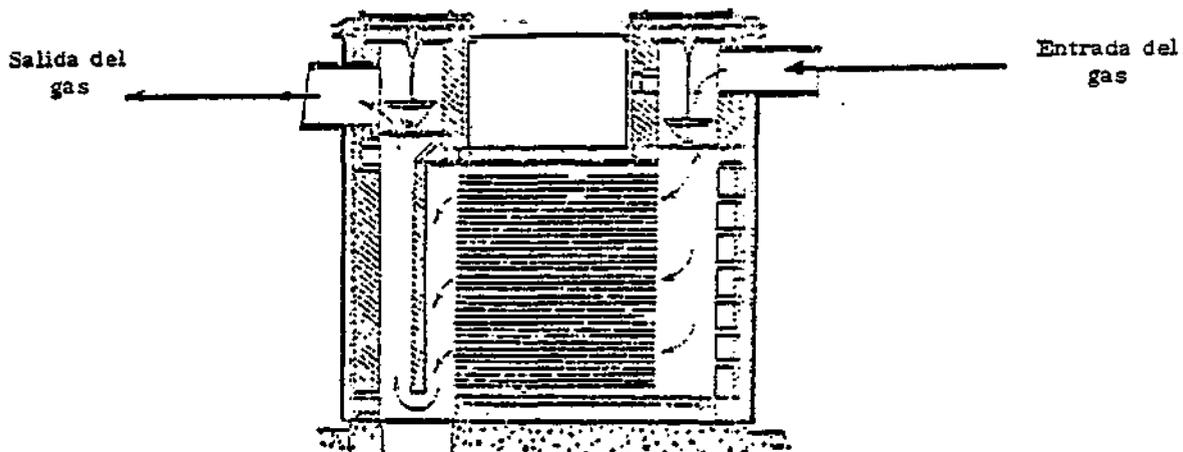


Figura. - 2.9.3.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2, / 122		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

a recorrer por las partículas, consiguiéndose por tanto una mayor eficacia de separación. El tiempo de sedimentación se reduce ahora a :

$$t'_s = \frac{t_s}{n}$$

siendo n-1 el número de placas intermedias, obteniéndose un nuevo diámetro mínimo que se separa en su totalidad como :

$$D'_p = \frac{D_p}{\sqrt{n}} \quad (21)$$

La instalación de estas placas de separación, presenta el inconveniente de que para descargar el polvo depositado sobre ellas, hay que interrumpir el flujo de gas, por lo que, en los procesos continuos, se necesitan dos cámaras en paralelo.

La eficacia de separación de la cámara, depende fundamentalmente de la granulometría del polvo que llega a la misma, por tanto, para conocer esta eficacia como fracción en peso de material recogido con respecto al total, hemos de conocer la granulometría del polvo y las velocidades de sedimentación de cada tamaño de partícula.

En la Tabla 2.9.3., se recogen las velocidades de sedimentación de partículas esféricas de densidad unidad, en aire a 20°C y 760 mmHg útiles para el diseño de las cámaras de sedimentación por gravedad.

TABLA 2.9.3.

Velocidades de sedimentación

Diámetro de las partículas en micras.	Velocidad experimental cm/sg	Velocidad calculada por Stokes cm/sg
0,1	$8,7 \times 10^{-5}$	$8,71 \times 10^{-5}$
0,2	$2,3 \times 10^{-4}$	$2,27 \times 10^{-4}$
0,4	$6,8 \times 10^{-4}$	$6,85 \times 10^{-4}$
1,0	$3,5 \times 10^{-3}$	$3,49 \times 10^{-3}$
2,0	$1,19 \times 10^{-2}$	$1,19 \times 10^{-2}$
4,0	$5,0 \times 10^{-2}$	$5,00 \times 10^{-2}$
10,0	$3,06 \times 10^{-1}$	$3,06 \times 10^{-1}$
20,0	1,2	1,2
40,0	4,8	5
$\overline{100}$	24,6	25
400	157	483
1000	382	3050

Un factor de diseño interesante para especificar las dimensiones de la cámara de sedimentación, es la velocidad de arrastre de las partículas por la corriente de gas. Se ha dicho antes que es norma utilizar una velocidad inferior a 10 pies por segundo, para evitar el rearrastré de las partículas.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,21 / 123		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

En la Tabla 2.9.4., se dan las densidades, diámetros medios y velocidades estimadas de rearrastre de algunos polvos industriales :

TABLA 2.9.4.

Velocidades de rearrastre para varios materiales

Material	Densidad gr/cm ³	Tamaño medio micras	Velocidad de rearrastre ft/sg
Virutas de aluminio..	2,72	335	14,2
Asbestos	2,20	261	17,0
Polvos de fundición..	3,02	117	18,8
Oxido de plomo	8,26	14,7	25,0
Caliza	2,78	71	21,0
Almidón.....	1,27	64	5,8
Virutas de madera ..	1,18	1370	13,0
Polvo de madera de sierra	--	1400	22,3

Se entiende que las dimensiones de la cámara de gravedad serán tales, que hagan que la velocidad de paso del gas sea siempre inferior a la velocidad de arrastre de las partículas.

9.3.2. Aplicación de las cámaras de sedimentación por gravedad

Ya se ha dicho que el uso de las cámaras de sedimentación por gravedad, está limitada a partículas superiores a 44 micras. Para estas partículas, las cámaras presentan una serie de ventajas con respecto a los demás equipos de separación, tales como :

- Fácil construcción.
- Bajos costos inicial y de mantenimiento.
- Bajas pérdidas de carga sin que existan prácticamente limitaciones de temperatura y presión, excepto las que se deriven de los materiales de construcción.
- Eliminación de los polvos recogidos con materiales secos.
- No existen problemas de abrasión por las bajas velocidades.

El principal inconveniente que presentan, es la necesidad de grandes espacios para su instalación.

Como ejemplo, se puede decir que la cámara de sedimentación de la Figura 2.9.4., aplicada a una planta de sinterización, utilizando un caudal de gases de 81 millones de ft³/hora, a temperatura ambiente, con una concentración a la entrada de 0,4 gr/ft³ (50 toneladas/día de sólidos) reduce la cantidad total de polvo a sólo 10 toneladas/día. Para un volumen de gases tan grande, el bajo consumo de potencia con las bajas pérdidas de carga, hace que la unidad opere muy económicamente.

Jennings ha calculado las curvas de eficacia fraccional para los dos componentes sólidos más importantes de una planta de sinterización que son el cuarzo (peso específico 2,6) y el óxido de hierro (peso específico 4,5).

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 124		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

La cámara utilizada es de 10 ft de altura y de anchura y 20 ft de longitud. El caudal de gases de 2 millones de ft³/hora. Las curvas de eficacia de la Figura 2.9.5., muestran que casi todas las partículas mayores de 80 micras de densidad 4, 5, son eliminadas y que las partículas de cuarzo con tamaño superior a 150 micras, se recogen en un 70%.

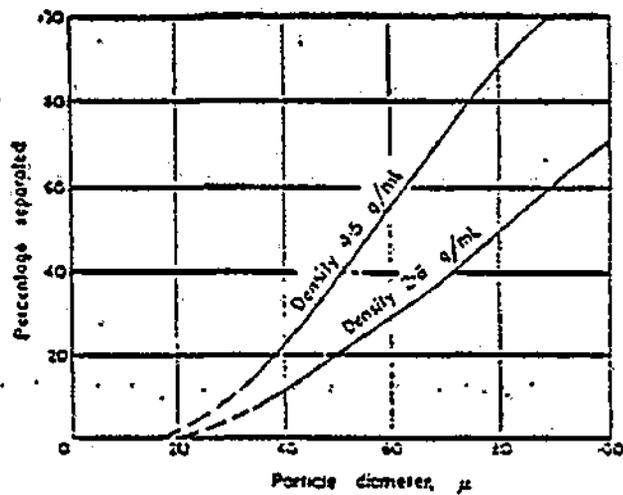
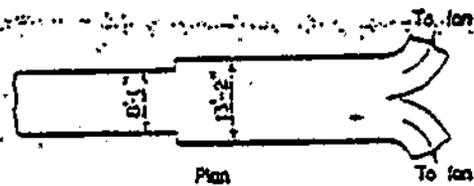
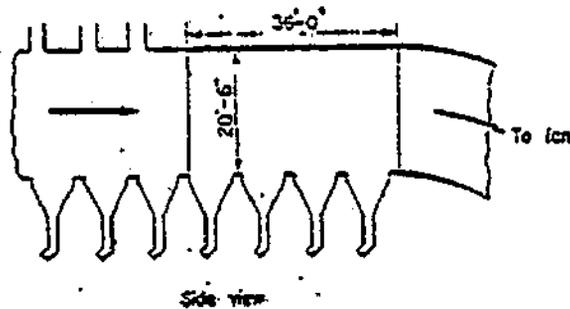


Figura. - 2.9.4.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,21 / 125		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

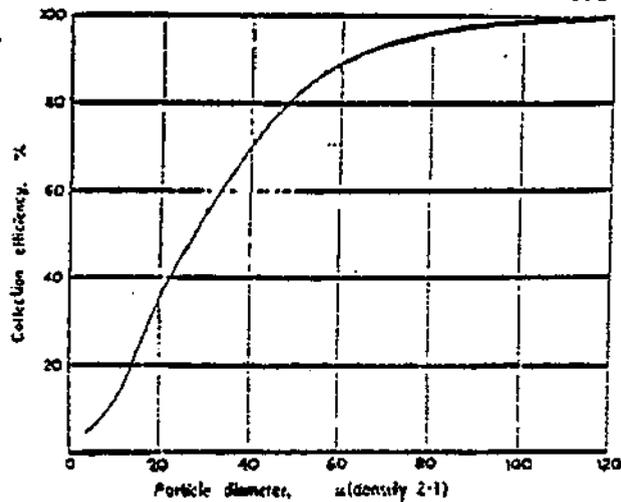


Figura. - 2.9.5.

De todo lo anterior, se deduce que las cámaras de sedimentación son los equipos más económicos y de uso más extendido para la prelimpieza de las emanaciones de materia particulada cuando los flujos sean muy grandes.

9.3.3. Cámaras de gravedad e inercia

La eficacia de una simple cámara de sedimentación por gravedad, puede mejorarse, así como se puede reducir las necesidades de espacio, cuando se le da a las partículas un movimiento hacia abajo que se adiciona al efecto de la separación por gravedad. El número de diseños posibles que actúan bajo este principio es muy grande, variando desde la incorporación de un simple baffle a la cámara de gravedad, hasta los jet más sofisticados que complementan los efectos de la sedimentación.

Las cámaras con un simple baffle (Figura 2.9.6.a) pueden colocarse en serie. Mientras su eficacia es del mismo orden de magnitud que la cámara horizontal, las pérdidas de carga son mucho mayores. Este efecto se puede disminuir dando a los baffles una forma redondeada (Figura 2.9.6.b).

Otros colectores que operan bajo este principio, consisten en cámaras que incorporan un conducto para dar un movimiento hacia abajo a las partículas del orden de $g/3$ que se suma al efecto g de la gravedad (Figura 2.9.6.c). Este equipo consta de un cono que aumenta gradualmente su diámetro consiguiendo unas velocidades bajas en la parte inferior de la cámara, para evitar los rearrastrés de las partículas depositadas. Una idea similar fue alcanzada con la cámara de sedimentación de Prockat (Figura 2.9.6.d), que culmina en la parte inferior con una tolva de recogida del polvo.

Existen otros equipos que operan aplicando cambios constantes de dirección a la corriente de gas que circula con una velocidad alta, originando impactos y, por lo tanto, retención de las partículas sobre las placas

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2 / 126		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

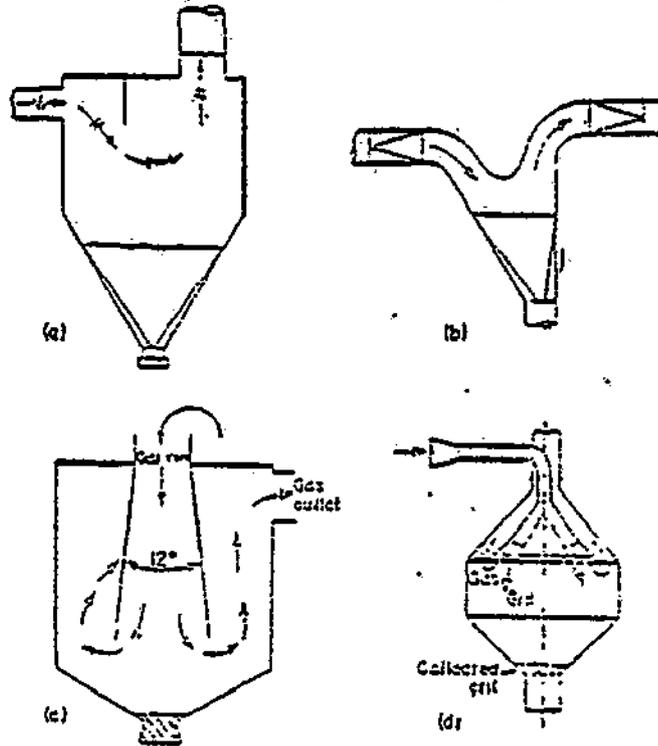


Figura. - 2.9.6.

de impacto (Figura 2.9.7.). La diversidad de estos equipos es muy grande, basándose su eficacia en el estudio de la impactación de la materia particulada sobre los impactadores. Esta eficacia, definida como la fracción de partículas que impactan sobre la placa quedando retenidas por ello, se muestra en la Figura 2.9.8., en función del número de separación N_s definido como :

$$N_s = \frac{D_p^2 \cdot V \cdot \rho_s}{18 \mu D_b} \quad (22)$$

siendo :

- N_s = número de separación adimensional.
- D_p = diámetro de la partícula en pies.
- V = velocidad relativa del gas sobre la placa pies/sg.
- ρ_s = densidad de la partícula libras/ft³.
- μ = viscosidad del gas a lb/ft. sg.
- D_b = diámetro de la placa en pies.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 21, / 127		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

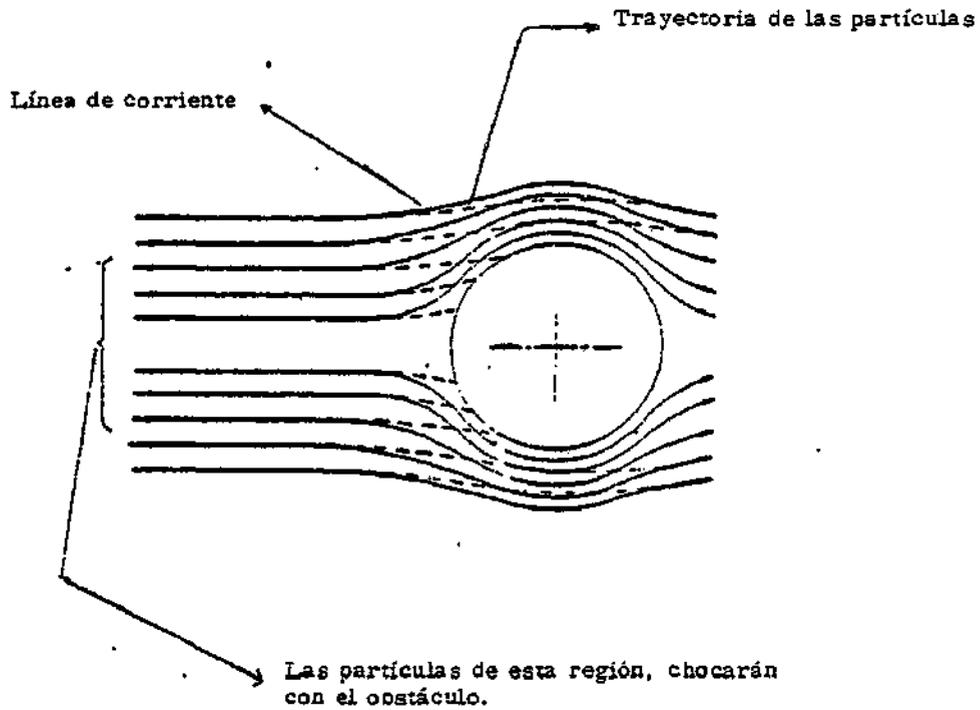


Figura. - 2.9.7.

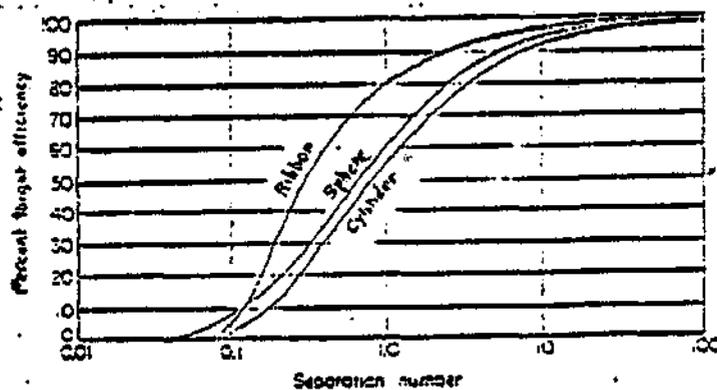


Figura. - 2.9.8.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2, / 128		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

Un equipo que opera bajo este principio, se recoge en la Figura 2.9.9., donde el impactador es un elemento primario de concentración del polvo, utilizándose un ciclón para la separación final del mismo, o bien una cámara de gravedad.

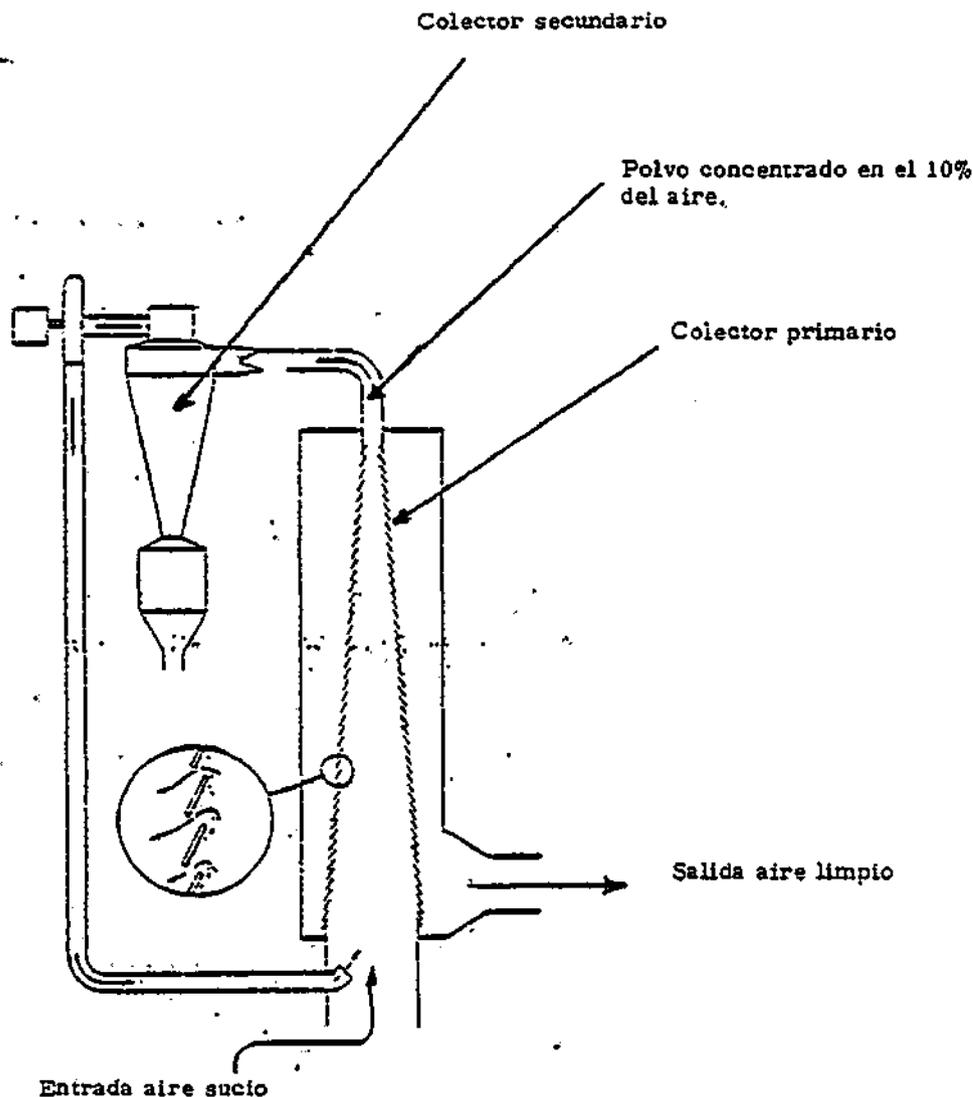


Figura. - 2.9.9.

9.4. COLECTORES CICLONICOS

El colector ciclónico es ampliamente utilizado, ya que se trata de uno de los separadores más económicos y versátiles para la eliminación de partículas sólidas de la corriente de un gas. Su eficacia es muy aceptable, llegando a separar partículas de hasta 5μ de tamaño y aún menores, si el polvo tiene propiedades agregativas.

El ciclón, es una estructura sin partes en movimiento, en el cual una corriente de gases entra con una determinada velocidad, transformándose la misma en un movimiento vorticial, desde el cual, las fuerzas centrífuga

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.9.10 / 129		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

gas tienden a conducir las partículas suspendidas, hacia las paredes del ciclón.

Los elementos base del ciclón son pues, una apropiada entrada del gas que produce el vórtice, una salida axial para el gas limpio, un sistema de descarga del polvo. En función de estas variables, los ciclones se clasifican en :

- a) Ciclón común, con entrada del gas tangencial y descarga del polvo axial.(Figura 2.9.10.a).
- b) Entrada tangencial con descarga periférica del polvo (Figura 2.9.10.b).
- c) Entrada axial de los gases a través de álabes que le dan movimiento rotacional con descarga axial del polvo (Figura 2.9.10.c).
- d) Entrada axial con descarga periférica del polvo (Figura 2.9.10.d).

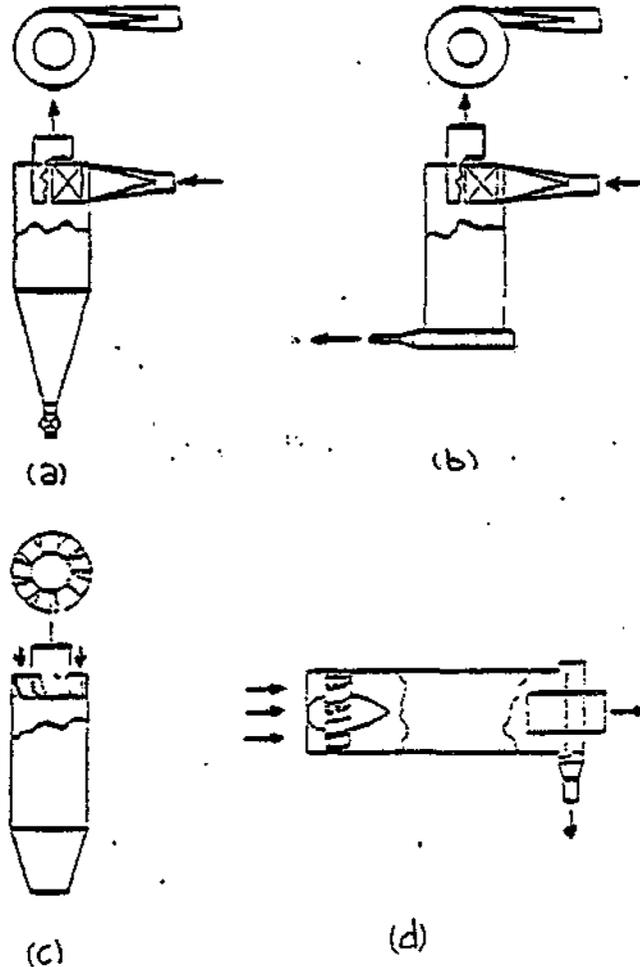


Figura. 2.9.10.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 130		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

9.4.1. Mecanismo de operación del ciclón

Vamos a utilizar el tipo de ciclón más común, con entrada tangencial de gases y salida axial, para describir el movimiento vorticial del gas en el interior del mismo. El gas entra con una velocidad tangencial cerca de la parte superior del cuerpo ciclónico cilíndrico, creando un vórtice o un flujo espiroidal hacia abajo entre las paredes del conducto de descarga del gas y el cuerpo del ciclón. Este vórtice, llamado vórtice principal, continúa hacia abajo, invirtiendo su dirección de flujo axial cerca del fondo del cono, pero manteniendo su dirección de rotación, de tal forma, que se origina un vórtice espiroidal interior al principal que conduce los gases desde el fondo del ciclón hasta la salida del mismo. La velocidad tangencial del gas en el vórtice v_t , aumenta a medida que el radio disminuye desde el radio del cuerpo ciclónico R_p hasta un valor máximo a un radio intermedio, disminuyendo la velocidad tangencial a partir de aquí, hasta hacerse cero en el eje del ciclón, cumpliéndose en todo instante la ecuación que define un movimiento vorticial.

$$v \cdot R^n = \text{Constante}$$

de tal forma que :

$$v_t = v_{tp} \left(\frac{R_p}{R} \right)^n \quad (23)$$

siendo :

- v_t = velocidad tangencial a un radio R .
- v_{tp} = velocidad tangencial en la pared del cuerpo ciclónico.
- R_p = radio del cuerpo ciclónico.
- R = radio al cual se le da la velocidad v_t
- n = exponente adimensional.

Para un gas ideal, n es igual a 1. Los valores reales están comprendidos entre 0,5 y 1, dependiendo del radio del cuerpo ciclónico y de la temperatura del gas.

El vórtice interior es generalmente de diámetro más pequeño que el conducto de salida del gas. El radio de este vórtice está comprendido entre 0,2 y 0,4 veces el radio del conducto de salida de gases, siendo el radio máximo de velocidad tangencial entre 0,4 y 0,8 veces el radio de salida del gas.

Ya que el radio del conducto de salida es mayor que el correspondiente a los puntos de máxima velocidad, esta máxima velocidad no se da en el ánulo, por lo que aparece un remolino en este ánulo, que hace elevar el gas junto a la pared del cuerpo ciclónico, hasta la parte superior, para ascender junto al conducto de salida. Este remolino origina igualmente movimiento de partículas que en su descenso son arrastradas por la salida del gas.

Cuanto mayor sea la longitud del conducto de salida de gases en el interior del cuerpo ciclónico, mayor será el remolino. Para evitar este fenómeno que se traduce en una disminución de eficacia, se utiliza la entrada de gases axial en vez de tangencial, evitando el ánulo o zona muerta de remolinos.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2, / 131		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

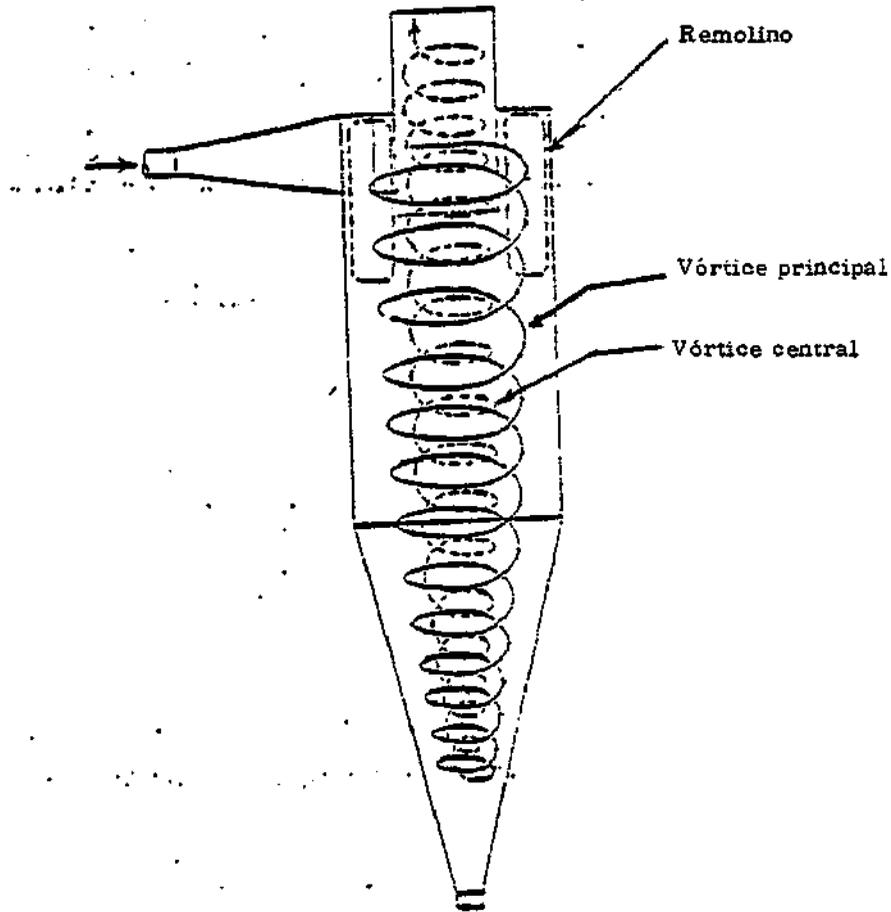


Figura. - 2.9.11.

9.4.2. Separación de partículas en el vórtice.

La materia particulada es separada del gas por la fuerza centrífuga que conduce a las partículas hacia la pared del cuerpo ciclónico a través de las líneas de corriente del flujo del gas. La fuerza radial impartida a las partículas es :

$$F_s = \frac{M_p \cdot v_p^2}{g R} \quad (24)$$

siendo :

F_s = fuerza de separación.

M_p = masa de la partícula.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 132		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

V_p = velocidad tangencial de la partícula.
 g = constante gravitacional.
 R = radio de rotación.

Suponiendo que la velocidad de la partícula es la misma que la del gas en la dirección tangencial, e introduciendo los parámetros para la masa de la partícula, la fuerza de separación será :

$$F_s = \frac{\beta \cdot \rho_s \cdot D_p^3 \cdot V_{tp}^2 \cdot R_p^{2n}}{g \cdot R^{(2n+1)}} \quad (25)$$

siendo :

ρ_s = densidad de la partícula.
 D_p = diámetro de la partícula.
 β = factor de forma volumétrico.

Las partículas se moverán acercándose a la pared del cuerpo ciclónico como consecuencia de la resultante de la fuerza centrífuga y de la resistencia, adquiriendo una velocidad límite o terminal u_t , cuyo valor se obtiene cuando $F_s - R = 0$.

Haciendo la simplificación de que la velocidad tangencial del gas es igual a la que éste lleva a la entrada del ciclón u_g , que las partículas son esféricas de diámetro D y que la velocidad límite se alcanza en el régimen de Stokes, se verificará que :

$$F_s = \frac{\pi \cdot D^3 \cdot \rho_s}{6g} \cdot \frac{u_g^2}{r}$$

$$R = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{u_t^2}{2g} = \frac{3\pi \cdot \mu \cdot D \cdot u_t}{g}$$

y, en consecuencia :

$$\frac{\pi \cdot D^3 \cdot \rho_s \cdot u_g^2}{6g r} = \frac{3\pi \cdot \mu \cdot D \cdot u_t}{g}$$

$$u_t = \frac{D_p^2 \cdot \rho_s \cdot u_g^2}{18 \cdot \mu} \quad (26)$$

En el caso más desfavorable de que la partícula sólida se encuentre lo más alejada de la pared del ciclón, es decir, que entre por el conducto en contacto con la pared interior a una distancia B_c de la pared cilíndrica del ciclón, el tiempo que tardará en alcanzar la pared será :

$$t_s = \frac{B_c}{u_t} = \frac{18 \mu B_c r}{D_p^2 \rho_s u_g^2} \quad (27)$$

supuesto el movimiento uniforme de velocidad igual a la límite ya calculada.

La Figura.2.9.12., muestra las proporciones geométricas más comunes de un ciclón de entrada tangencial.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2: / 133		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

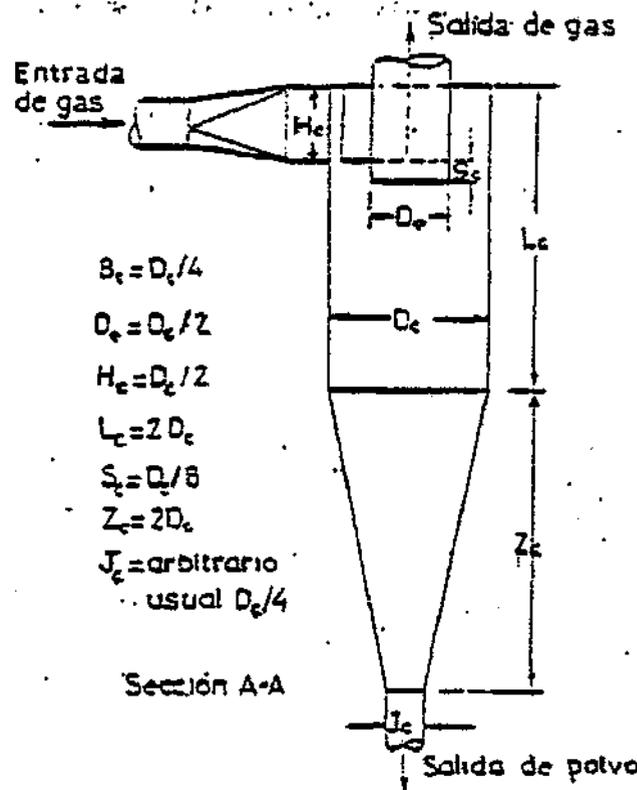


Figura. -2.9.12.

Para que la partícula no escape del ciclón, es necesario que llegue a la pared antes de que el gas inicie su movimiento en la espiral interior. Si N_e es el número de vueltas que debe dar el gas en el vórtice exterior, con una velocidad tangencial media supuesta igual a u_g , el tiempo de permanencia del gas en el vórtice exterior, se puede estimar aproximadamente como :

$$t_p = \frac{2 \pi N_e r}{u_g} \quad (28)$$

y se deberá verificar que $t_s \leq t_p$, para que la totalidad de las partículas con diámetro D_{\min} lleguen a separarse, es decir, en el caso límite,

$$\frac{18 \mu S_c r}{D_{\min}^2 \rho_s u_g^2} = \frac{2 \pi N_e r}{u_g}$$

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{9 B_c \mu}{u_g \rho_s N_e}}$$

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 134		
	2	TEMA : CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

y cuando $B_c = D_c/4$, resulta que :

$$D_{min} = \sqrt{\frac{9 \mu D_c}{4 \pi N e u_g \rho_s}} \quad (29)$$

Laple ha obtenido la siguiente expresión experimental para un diámetro de corte D_{50} definido como el tamaño para el que la eficacia de colección es el 50%.

$$D_{50} = \sqrt{\frac{9 \mu B_c}{2 \pi N e v_g \rho_s}} \quad (30)$$

expresión que puede obtenerse de los anteriores cuando sea :

$$D_{50} = \frac{D_{min}}{\sqrt{2}}$$

Para el caso del ciclón standard de la Figura 2.9.13., donde $N e$ se toma igual a 5,

$$D_{50} = \sqrt{\frac{\mu D_c}{14 u_g (\rho_s - \rho)}} \quad (31)$$

En definitiva, el ciclón se comporta como un concentrador del polvo en la proximidad de las paredes del ciclón, cayendo éste a través de dichas paredes. En la parte inferior del ciclón, existen los mecanismos de descarga de las partículas sólidas que evitan un posible rearrastré de las mismas por la corriente del gas. La longitud y relación de dimensiones del cuerpo ciclónico y del cono de recogida, afecta a la posible existencia de arrastres. El que las paredes interiores del cuerpo ciclónico sean suficientemente lisas, es esencial para prevenir posibles remolinos locales que introduzcan de nuevo el polvo en la zona activa del ciclón. La descarga de fondo de los sólidos debe ser completamente estanca al objeto de evitar escapes de gas si se opera a presión o entradas de aire, si se opera en depresión. La estanqueidad se logra mediante cierres especiales, tipo clapeta, de doble cierre (uno abre, mientras el otro está cerrado de forma alternativa) o cierres alveolares rotatorios. La entrada de aire por el fondo disminuye de forma importante la eficacia de colección, mientras que la purga de gas la aumenta.

9.4.3. Eficacia en los ciclones

Los ciclones se dividen general mente en dos clases, a saber : ciclones convencionales y ciclones de alta eficacia. Los de alta eficacia tienen un diámetro de cuerpo ciclónico pequeño, para conseguir mayores fuerzas de separación, aunque realmente no existe una línea clara de clasificación de los ciclones. Generalmente se consideran ciclones de alta eficacia, los que tienen un diámetro de cuerpo ciclónico inferior a 9 pulgadas.

Los rangos de eficacia comparativos, se muestran en la Tabla 2.9.5.

En general, la eficacia aumentará con el aumento del tamaño de partícula, o la densidad; con la velocidad del gas de entrada, longitud del cono y relación del diámetro del cuerpo ciclónico al diámetro de salida del gas. Por el contrario, la eficacia disminuye con el aumento de la viscosidad y densidad del gas, diámetro del ciclón, diámetro de salida del gas y con el área de entrada de los gases al ciclón.

Las únicas limitaciones existentes para reducir el tamaño de un ciclón al objeto de aumentar su eficacia son

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./135		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

dos: el aumento de la pérdida de presión del gas, que resulta cuando aumenta su velocidad de entrada y la aparición de fenómenos de erosión en las paredes del ciclón, cuando ésta sobrepasa ciertos valores críticos próximos a los 20 m/sg para materiales duros. En consecuencia, si el caudal total del gas es conocido, el máximo rendimiento de la operación se obtendrá disponiendo de varios ciclones iguales en paralelo, de forma que la velocidad de entrada del gas en cada uno de ellos ocasiona una pérdida de carga inferior a la admisible y no se sobrepase el valor de la velocidad crítica, que daría lugar a una rápida erosión de las paredes.

TABLA 2.9.6.

Tamaño de partícula	Rango de eficacia (% peso recogido)	
	Convencional	Alta eficacia
Menor que 5 μ	< 50	50 - 80
5 - 20 "	50 - 80	80 - 95
15 - 40 "	80 - 95	95 - 99
40 "	95 - 99	95 - 99

Rosin, Ramler e Intelman, obtuvieron una velocidad teórica que proporcionaba la eficacia de separación para partículas de cualquier tamaño D, en función de la relación D/D_{50} . Tal relación correspondía a una línea recta en el diagrama doblemente logarítmico eficacia-relación de diámetro tal y como puede verse en la Figura 2.9.13.

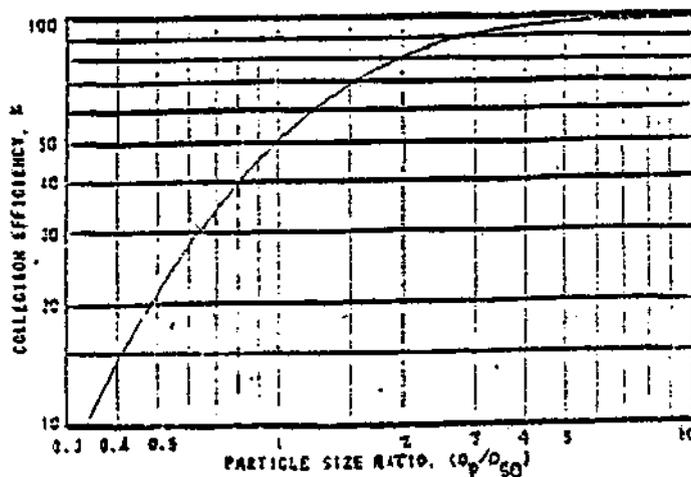


Figura - 2.9.13.

Sin embargo, en la realidad, la correspondencia se realiza según una curva característica en cada caso, según las propiedades del sólido, pero que generalmente puede considerarse como recta para valores de D/D_{50} inferiores a 0,7.

En la Tabla 2.9.6., se recogen valores típicos de la eficacia, obtenidos como valores medios de diferentes experimentaciones :

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, 1 / 136		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

TABLA 2.9.6.

Datos representativos de la eficacia de los ciclones.

Relación de tamaños D/D ₅₀	Eficacia %	Relación de tamaños D/D ₅₀	Eficacia %
10,0	99	1,0	50
7,0	98	0,7	33
5,0	96	0,5	20
3,0	90	0,3	8
2,0	80	0,2	4
1,5	69	-	-

La eficacia global de la separación depende de la distribución granulométrica del polvo contenido en la alimentación y se calcula conocida ésta.

Para calcular la eficacia global, se precisa conocer, en primer lugar, el diámetro de corte que se obtiene a través de la ecuación y conjugarlo con la curva de eficacia, según la Figura 2.9.13.

A partir de la distribución granulométrica del polvo, del diámetro de corte y de la curva de eficacia, determinaremos la eficacia global con sumas de eficacia parciales.

Mediante la curva de eficacia, se puede predecir la eficacia de un equipo ciclónico, siempre que se conozca la granulometría del polvo que queremos separar.

Para partículas de forma no esférica, el análisis del tamaño del polvo, se hará en términos de velocidad libre de caída de la esfera equivalente (esfera que cae con la misma velocidad, en el mismo medio y del mismo material). El análisis se ha de efectuar por elutriación.

Las curvas de eficacia sólo se modifican en función de las variables de operación, que son :

- Densidad del polvo.
- Diámetro del ciclón.
- Viscosidad del gas.
- Velocidad de entrada.

de tal forma que la nueva curva se obtiene multiplicando la abscisa por un factor derivado de :

$$\text{factor} = 1,0 \times \frac{2700}{\rho} \times \frac{\mu}{1,8 \times 10^{-5}} \times \frac{D}{D'} \times \frac{15,2}{V_1} \quad (32)$$

siendo :

- ρ = densidad del polvo a ser tratado kg/m³.
- μ = viscosidad del gas Ns/m².
- D = diámetro del ciclón objeto de estudio (mm.)

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 137		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

D' = diámetro del ciclón para que se conoce la eficacia mm.

V_1 = velocidad de entrada al ciclón en m/sg.

Esta curva así obtenida, servirá para calcular la eficacia total como suma de eficacias parciales, igual que se dijo antes.

9.4.4. Pérdida de carga en los ciclones

No existe un método conocido exacto para determinar la pérdida de carga en los ciclones, su estudio debe hacerse por comparación de los ciclones industriales con un prototipo. Existen, sin embargo, varios métodos aproximados que pueden ayudar a predecir la pérdida de carga esperada. Recogemos aquí el método apuntado por Alexander, que supone que la pérdida de carga es una función del área de entrada del gas al ciclón y del área de salida

$$\Delta P_c = \frac{C \cdot A}{D_e^2}$$

siendo : ΔP_c el número de cargas de velocidad que afectará al término $u_g^2/2g$ para dar la energía perdida en kgm/kg, o bien a $\rho \cdot u_g^2/2g$ para dar directamente la pérdida de presión en kg/m².

C = un coeficiente adimensional característico de la forma y proporciones del ciclón (Tabla 2.9.7.).

A = el área de la sección de entrada.

D_e = el diámetro del conducto de salida.

TABLA 2.9.7.

Valores de C en la ecuación, en función de la forma y proporciones del ciclón.

Relación D_c / D_e	Relación $\frac{L_c + Z_c}{D_c}$	Forma de entrada	C
2	4	Tangencial	28
2	4	Involuta 180º	22
1,6 - 3,3	-	Involuta completa	18
2 - 4	4	Tangencial	16
1,5	5	Tangencial	24,5
3	2	Tangencial	39
1,5	2	Involuta 180º	23
3	5	Involuta 180º	25

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 3.2. / 138	
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A	
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10 80

9.4.5. Efectos de las variables de operación sobre las características de funcionamiento de un ciclón

- Influencia del caudal y de la velocidad de entrada

La pérdida de carga teórica varía con el cuadrado del caudal empleado y, por lo tanto, con el cuadrado de la velocidad de entrada. De aquí, que resulte razonable expresar las pérdidas de carga totales como número de altura de velocidad de entrada en el ciclón.

La eficacia varía con el caudal. La eficacia aumenta a medida que aumenta el caudal y la velocidad de entrada hasta un valor límite de ésta por encima de la cual, la turbulencia interna originada, aumenta más rápidamente que la separación, causando por tanto una disminución de la eficacia. Esta velocidad limitante, no es problema en el mayoría de los equipos, por suceder a más de 20 metros por segundo, y para estas velocidades, las pérdidas de carga son tan grandes que hacen impracticable el uso del ciclón.

Del análisis de la influencia de la velocidad de entrada con la eficacia, se obtienen las siguientes conclusiones :

- a) A medida que aumenta la velocidad desde cero, hay una primera región donde la variación es lineal. La pendiente de la recta es mucho más pronunciada para partículas mayores y diámetros del ciclón pequeños - que para finas partículas y diámetros de ciclón mayores. La línea recta continúa hasta el 70% de eficacia y cae a partir de aquí rápidamente hasta ponerse horizontal. Figura 2.9.14.
- b) En muchas instalaciones, la variación de la eficacia con la velocidad de entrada, se ve enmascarada por un aumento del tamaño de partícula o un aumento de la concentración del polvo en los gases. Ambas propiedades, afectan a la eficacia independientemente.

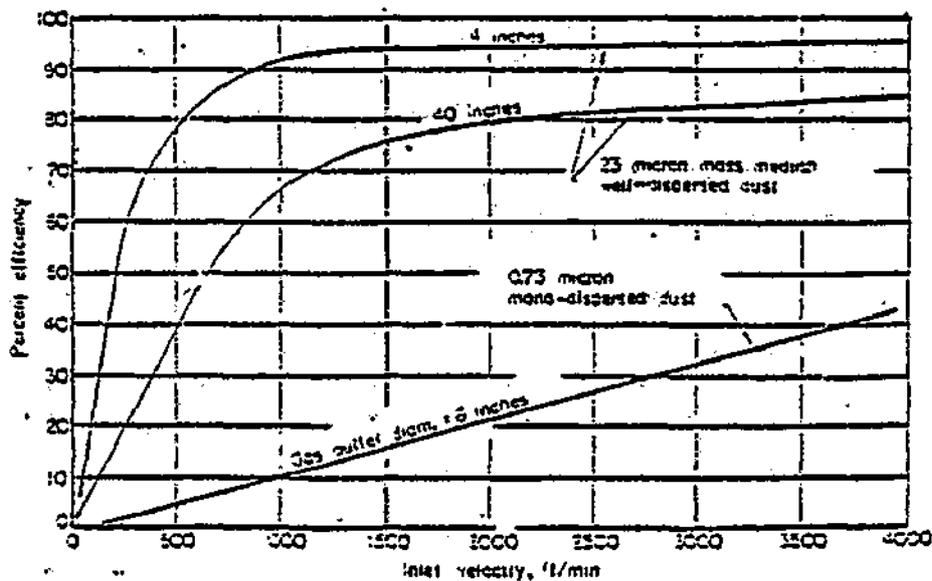


Figura. - 2.9.14.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 139		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

c) La representación de la eficacia frente a las pérdidas de carga, es más útil para la selección del ciclón que la representación frente al flujo. Figura 2.9.15.

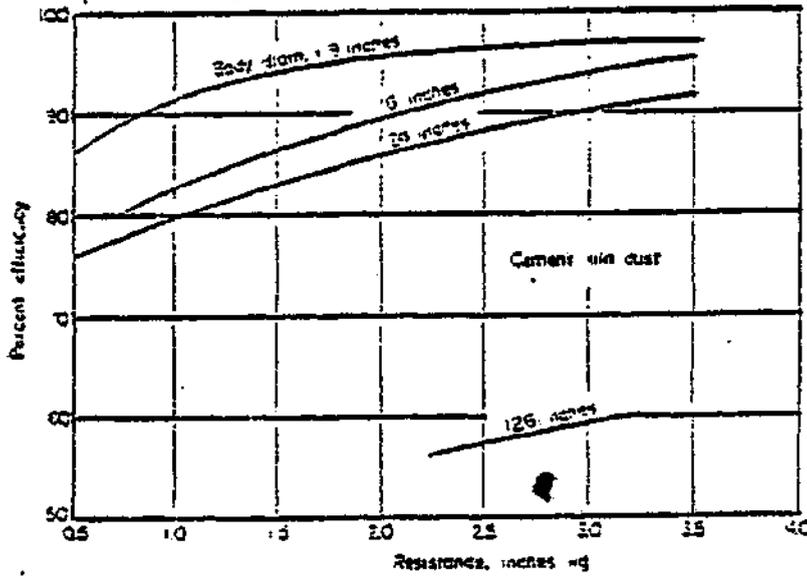


Figura. - 2.9.15.

d) La expresión aproximada que relaciona la eficacia con el caudal, puede ser la siguiente :

$$\frac{100 - \eta_a}{100 - \eta_b} = \left(\frac{Q_b}{Q_a} \right)^{0.5}$$

siendo :

- η_a = eficacia de colección en la condición a
- η_b = eficacia de colección en la condición b
- Q_b = caudal ft^3/min en la condición b
- Q_a = caudal ft^3/min en la condición a

- Influencia de las propiedades físicas del gas

La pérdida de carga del ciclón, se ve afectada por la temperatura, densidad y presión del gas, como se indica en la ecuación :

$$h = \frac{K Q^2 \rho}{T}$$

- h = pérdida de carga en pulgadas de columna de agua
- K = constante de proporcionalidad
- Q = caudal en ft^3/min
- ρ = presión absoluta en atmósferas

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 140		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	30

ρ_g = densidad del gas en lb/ft³
T = temperatura absoluta en °K

La viscosidad del gas aumenta a medida que aumenta la temperatura, disminuyendo la eficacia con este aumento. La relación entre la eficacia y la viscosidad del gas, suponiendo constante el caudal, se puede estimar por la expresión :

$$\frac{100 - \eta_a}{100 - \eta_b} = \left(\frac{\mu_a}{\mu_b} \right)^{0.5}$$

donde μ es la viscosidad en las condiciones a y b.

La densidad del gas influye teóricamente en la eficacia, pero su influencia es tan pequeña, comparada con la densidad de las partículas, que para todos los efectos, se considera prácticamente despreciable. Si se trabaja a muy altas presiones, el efecto puede ser significativo, estimándose su influencia por la expresión :

$$\frac{100 - \eta_a}{100 - \eta_b} = \left(\frac{\rho_s - \rho_{gb}}{\rho_s - \rho_{ga}} \right)^{0.5}$$

- Influencia de las propiedades del polvo

Las propiedades del polvo a ser recogido, son las variables que influyen en mayor grado sobre la eficacia del ciclón, siendo su influencia difícil de determinar. Aunque son todas las propiedades del polvo las que influyen, sólo se han cuantificado las relativas al tamaño y densidad de partículas. Un método exacto para determinar la eficacia del ciclón en función de la curva granulométrica del polvo, consiste en, conocida la eficacia para todo el rango de tamaños en función de unas variables de operación (Figura 2.9.16) y conocida la distribución granulométrica del polvo calculada por el método de elutriación (Figura 2.9.17), se tabula -

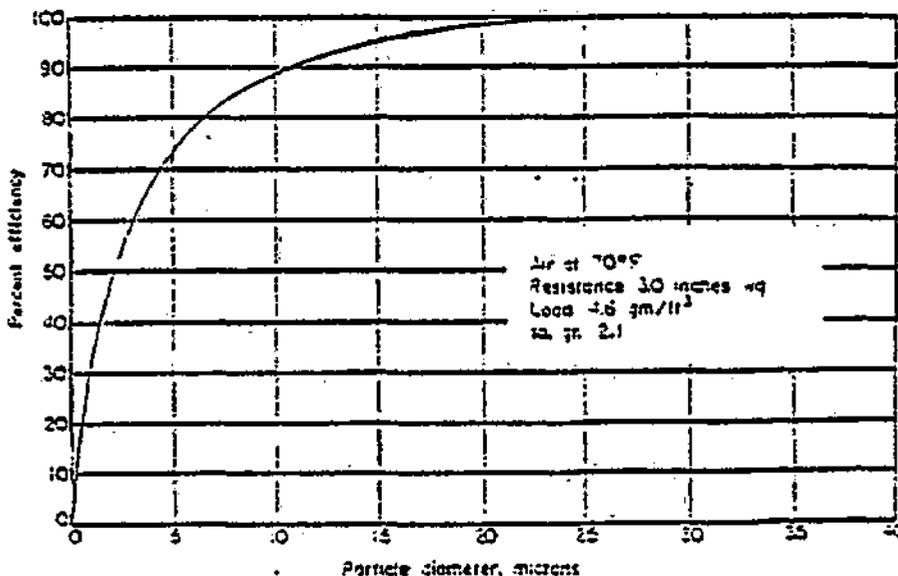


Figura. - 2.9.16.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2:2:1 / 141		
	2	TEMA : CONTA MINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

La correspondiente eficacia para todos los tamaños de partículas obtenida de la Figura 2.9.16.

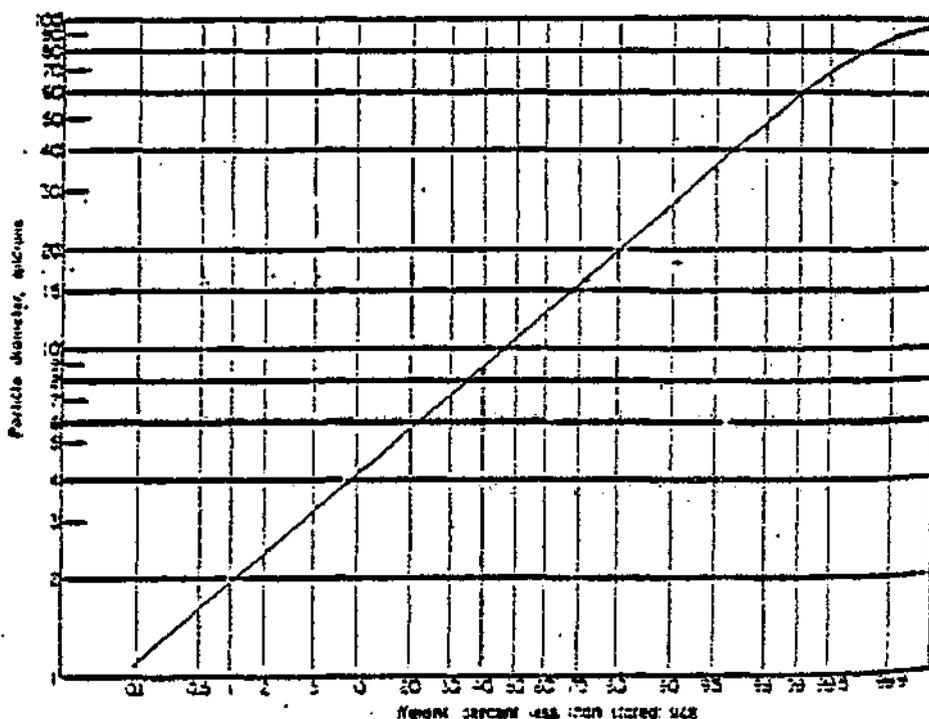


Figura. - 2.9.17.

Se representa entonces el tanto por ciento en peso menor que un determinado tamaño, frente a la eficacia - fraccional correspondiente; la ordenada media que deja la misma área superior que inferior, corresponde a la eficacia global de separación del ciclón. Figura 2.9.18.

La eficacia de colección de un ciclón, es mayor para partículas de alta densidad, que de baja densidad. A un que teóricamente, la variación de la eficacia es con la raíz cuadrada de la densidad de la partícula, los datos experimentales no confirman esto, como se refleja en la Figura 2.9.19.

- influencia de la concentración de polvo

Al aumentar la carga de polvo, las pérdidas de carga se hacen más bajas, aumentando la eficacia. Aparentemente, la pérdida de carga para un polvo de una concentración de 75 - 100 granos/ft³, es del orden del - 75 - 85% de la correspondiente al aire limpio. Existe una correlación aproximativa :

$$\Delta P_d = \frac{\Delta P_c}{0,013 \sqrt{C_i} + 1}$$

donde :

- ΔP_d = es la pérdida de carga para aire cargado de polvo.
- ΔP_c = es la pérdida de carga para el aire limpio.
- C_i = es la concentración de polvo a la entrada de granos. ft³.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 142		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL PRO FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

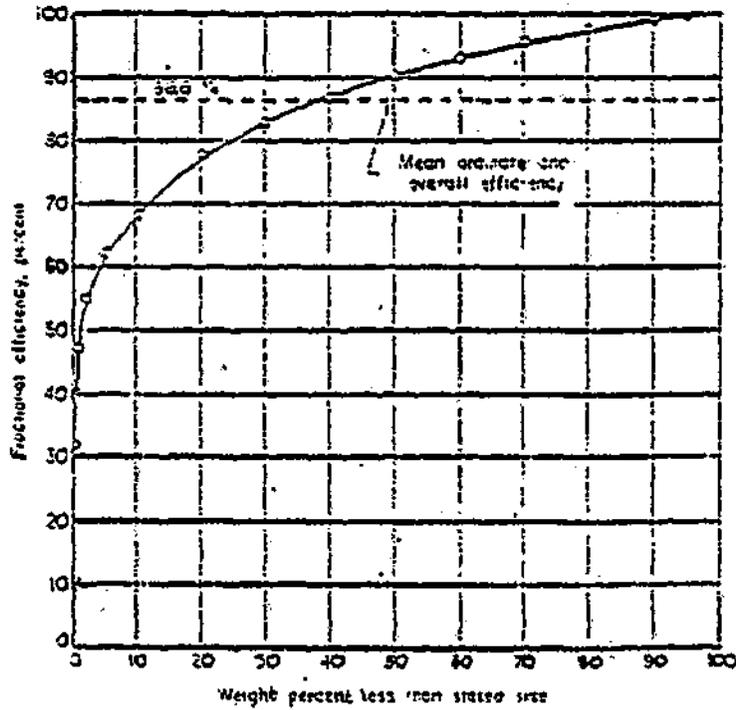


Figura. - 2.9.18.

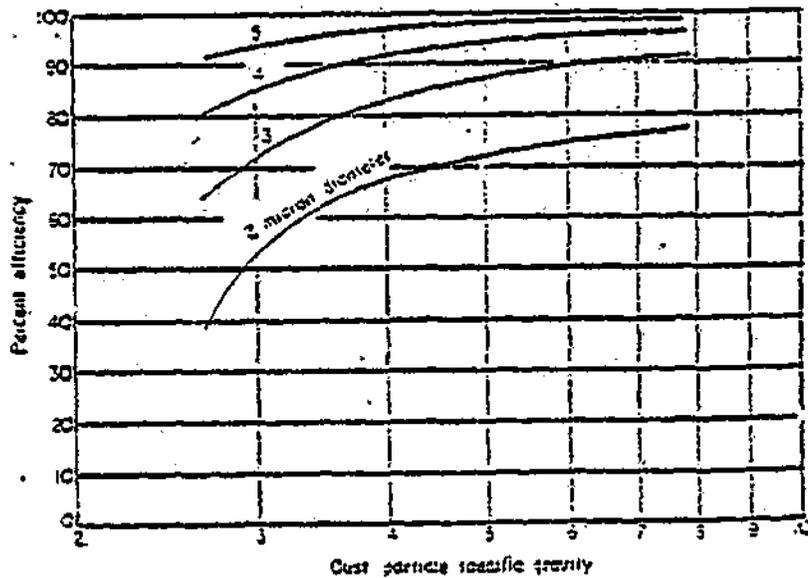


Figura. - 2.9.19.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./143		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	9	CAPITULO : EQUIPOS DE CONTROL POR FUERZA CENTRIFUGA Y GRAVEDAD	01	10	80

El problema de las altas concentraciones de polvo, es la erosión y el taponamiento que se pueden producir en el cuerpo ciclónico.

Para cargas de polvo muy altas, el movimiento de las partículas mayores hacia la pared del ciclón, crea un arrastre de las más pequeñas en la misma dirección. Baxter ha desarrollado una ecuación obtenida de una serie de estudios que indica la variación de la eficacia con la concentración

$$\frac{100 - \eta_a}{100 - \eta_b} = \left(\frac{C_{bi}}{C_{ai}} \right)^{0,182}$$

9.4.6. Operación de ciclones en serie

La eficacia de dos ciclones en serie se expresa como :

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 (100 - \eta_1)$$

η = eficacia de la combinación de los dos ciclones

η_1 = eficacia del ciclón primario

η_2 = eficacia del ciclón secundario

El cálculo de la eficacia del segundo ciclón es muy difícil. Este segundo ciclón, sirve para separar las partículas no recogidas en el primero por efectos de eficacia, arrastres, etc. Es práctica común suponer que la eficacia del segundo ciclón es la mitad del primero.

La ventaja de operación de los ciclones en serie se derivan de :

- Los aglomerados de polvo que son frágiles y están sujetos a su rompimiento cuando se someten a altas velocidades, pueden ser recogidos ventajosamente cuando se opere con ciclones en serie a bajas velocidades.
- Se puede utilizar una serie de un ciclón primario para recoger las partículas más gruesas con otro que recoja las más pequeñas y de mayor eficacia.

9.4.7. Erosión en los ciclones

La erosión en los ciclones es motivada por el impacto y el rozamiento de las partículas de polvo sobre las paredes del ciclón. La erosión es grande cuando la concentración de polvo y la velocidad de entrada es elevada y cuando las partículas son grandes y duras. Cualquier defecto en el diseño del ciclón, tiende a concentrar el polvo que se está desplazando y a darle una velocidad elevada que favorece la erosión. Las áreas más atacadas por la erosión, son la frontal a la entrada del polvo y la parte inferior del cono, especialmente si existe rugosidad por soldadura o mal acabado.

La descarga del polvo es un factor importante para prevenir la erosión, si ésta descarga no se hace de una manera efectiva y continua, existe recirculación del polvo que causa erosión y pérdida de eficacia.

Igualmente, la existencia de remolinos particularmente si se trata de grandes partículas, favorece el fenómeno. Este efecto se puede evitar disponiendo deflectores en las zonas de remolinos con placas de material resistentes a la abrasión.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 144		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	10	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10	80

10.1. INTRODUCCION

El control de contaminantes por lavado (scrubbing), se aplica para la separación de los mismos en los tres estados de agregación de la materia: sólido, líquido y gaseoso. La transferencia del contaminante desde la corriente gaseosa al líquido de lavado, requiere el contacto íntimo de las dos fases.

Cuando el contaminante se presenta en forma sólida, como materia particulada, la transferencia de materia de la fase gas a la fase líquido, involucra varios mecanismos complejos, tales como las fuerzas de inercia, gravitacionales, electrostáticas, térmicas y los fenómenos de difusión.

Cuando el contaminante se presenta en forma gaseosa, la transferencia de masa, se realiza por difusión, moviéndose en el sentido del gradiente de concentración. En la barrera de separación entre la fase gaseosa (a descontaminar) y la fase líquida (con poco o ningún contaminante) se crea una interfase, donde se pone de manifiesto el gradiente de concentraciones, que controla el paso de contaminante desde la fase gas, a la fase líquida por difusión molecular y turbulenta.

La transferencia de masa, va correlacionada con las otras transferencias de energía, transferencia de calor y de cantidad de movimiento, siendo ésta última la medida de pérdida de energía que tiene lugar en el scrubber, y que es necesario aportar para compensar las pérdidas por fricción que en él se dan.

La eficacia, o rendimiento del equipo para separación de un contaminante gaseoso, depende en gran parte del gradiente de concentraciones entre las fases gaseosa y líquida, y del nivel de proximidad al equilibrio con que se diseñe el scrubber, pues en el equilibrio de ambas fases el rendimiento sería nulo. Cuando se trata de separar un contaminante particulado, el rendimiento es función de la distribución de tamaños de las partículas que se deseen retener y del mecanismo descontaminante que se fomente en el diseño. La capacidad del equipo, viene determinada por el caudal para el cual el scrubber se hace inoperante, por arrastrar el gas al líquido, o por llegar a ser excesiva la caída de presión. Como regla general, la altura o longitud de contacto de las dos fases, crece con la eficacia requerida, y la sección transversal necesaria, crece con el caudal de corriente gaseosa contaminada que se necesite tratar.

10.2. ABSORCION DE GASES

El objeto perseguido, es la consecución de la máxima transferencia de masa contaminante del gas al líquido, con el mínimo coste posible.

Se deben distinguir dos tipos de tratamiento y diseño, en función de que el contaminante transferido, reaccione o no con la fase líquida. En el caso más desfavorable, que tiene lugar cuando no existe reacción química, el techo de transferencia alcanzable, viene fijado por la solubilidad del contaminante en el líquido, para las condiciones de trabajo del scrubber.

La solubilidad de un gas en un líquido, se describe bastante bien mediante la "Ley de Henry":

$$P_A = H X_A$$

donde :

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 145		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER.	10	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10	80

- P_A = Presión parcial del componente A en el gas.
- H = Constante de Henry.
- X_A = Fracción molar del componente A en el líquido.

Existen tablas, donde se recoge el valor numérico de la constante de Henry, para los gases más comunes en contaminación ambiental, en función de la temperatura, utilizando como líquido lavador el agua.

10.2.1. Esquema de contacto

La cantidad de masa transferida, depende no sólo de la curva de equilibrio del sistema, sino también del esquema de contacto diseñado.

La puesta en contacto de las dos fases, puede realizarse por contacto continuo de las mismas o mediante etapas, dependiendo del tipo de equipo empleado.

Según se lleve a cabo la operación, el contacto se puede realizar, disponiendo los flujos en contracorriente, equicorriente o flujos cruzados.

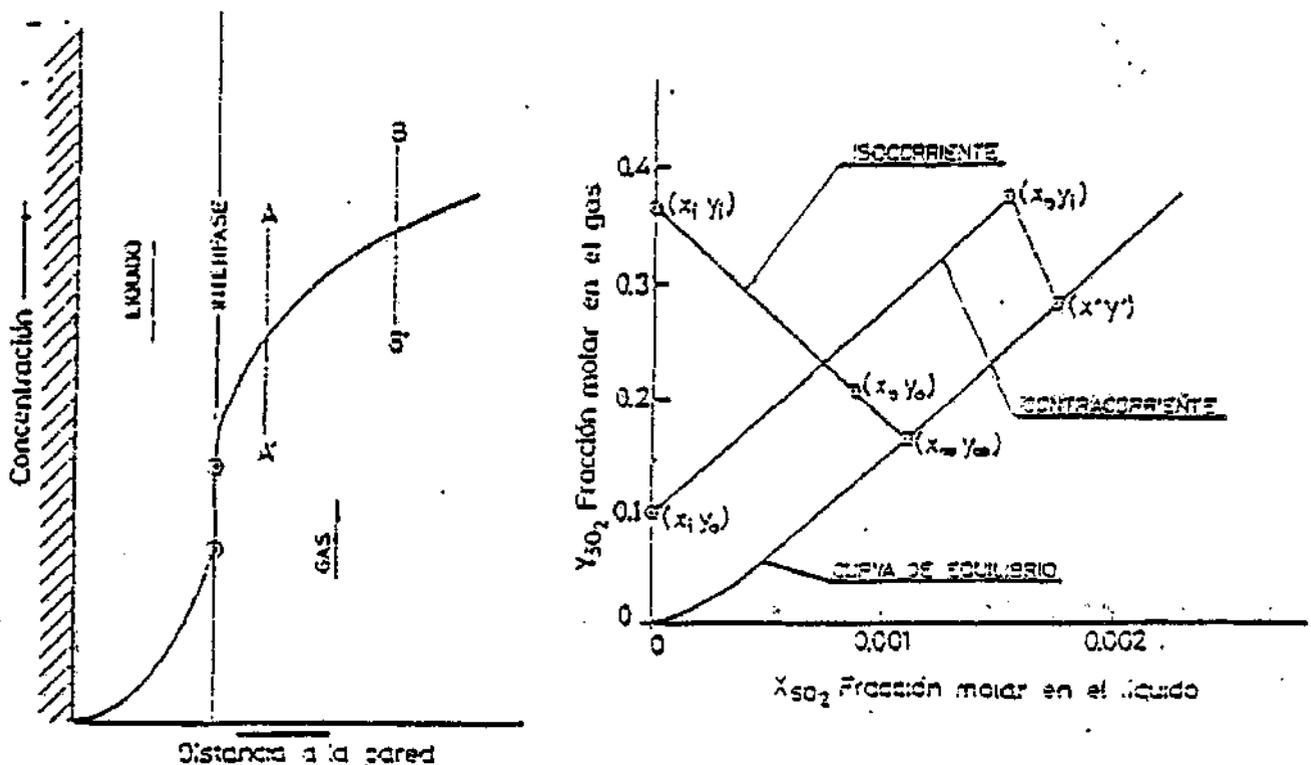


Figura. - 2.10.1.

En la Figura 2.10.1., se recogen gráficamente el gradiente de concentraciones entre la fase gas y líquido, así como los contactos en equicorriente y contracorriente, representando las fracciones molares del conta-

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 146		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	10	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10	80

minante a separar en la fase gas (y) frente a las fracciones molares del mismo componente en la fase líquido (x). Las ecuaciones que definen las rectas de operación, obtenidas mediante un balance de masa en el equipo son:

$$G (y_1 - y) = L (x_0 - x) \text{ contracorriente}$$

$$G (y_1 - y) = L (x - x_1) \text{ equicorriente}$$

donde los subíndices "1", representan las condiciones de entrada y los "0", las de salida.

En ambos casos, las pendientes de las rectas de operación, vienen dadas por L/G, siendo positivas en el caso de flujo en contracorriente y negativas para el flujo en isocorriente.

Para el caso de flujo cruzado, el tratamiento se complica considerablemente, y el análisis se suele realizar asumiendo instantáneamente a lo largo de un plano paralelo al flujo de la otra fase, suponiendo en dicho plano "x" o "y" constante, con lo que se permite un tratamiento similar al utilizado en los otros casos.

10.2.2. Aproximación al equilibrio

La medida del rendimiento de un scrubber, para absorción de contaminantes gaseosos, es el grado con el cual las dos corrientes se aproximan al equilibrio.

La transferencia de masa y el tiempo de contacto, son las variables que determinan la aproximación al equilibrio. La transferencia de masa, se describe matemáticamente mediante los coeficientes individuales de transferencia de materia :

$$N = k_g (p - p^*) = k_g P (y - y^*) \text{ fase gas}$$

$$N = k_1 (c_1^* - c_1) \approx k_1 \rho_M (x^* - x) \text{ fase líquida}$$

donde el asterisco se reserva para las condiciones de equilibrio, con la fase contraria en contacto con ella, siendo N el número de moles transferidos por unidad de tiempo y área, que para el caso de bajas concentraciones, la expresión de transferencia en la fase líquida queda en función de la densidad molar.

Normalmente, se utilizan los coeficientes globales de transferencia, quedando las ecuaciones de la forma :

$$N = K_{OG} (p - H C_1) = K_{OL} \left(\frac{p}{H} - C_1 \right)$$

donde H es la constante de Henry, que es precisamente la pendiente de la recta de equilibrio a bajas concentraciones, que son las que en esta aplicación concreta interesan.

Los coeficientes de transferencia de materia, globales e individuales, en fase gas y líquido, están relacionados por las expresiones :

$$\frac{1}{K_{OG}} = \frac{1}{k_g} + \frac{H}{k_1}$$

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{H k_g}$$

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 147		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	10	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10	80

La resistencia a la transferencia del contaminante gaseoso, aparece en la fase gas, si éste es muy soluble en el líquido, sucediendo lo contrario, que la resistencia aparecería en la fase líquida, si el contaminante fuera poco soluble. A partir de la expresión :

$$\frac{k_g}{K_{OG}} = 1 + \frac{H k_g}{k_l}$$

Si $k_g \approx K_{OG}$, la transferencia de masa está controlada por la fase gas, siendo $k_g/K_{OG} \leq 1$, si, por el contrario, $k_g/K_{OG} \geq 10$, la transferencia está controlada por la fase líquida. Como k_g/k_l , es prácticamente constante, la variación obedece a H, según que sea $H \leq 30$ o $H \geq 3000$.

Por todo esto se puede decir, que la eficacia de la absorción de gases, está basada solamente en la solubilidad, y en la relación de caudales de líquido y gas.

Los coeficientes de transferencia de materia, se pueden predecir, existiendo bibliografía más o menos coincidente, en función de los modelos utilizados. Siguiendo el modelo de la teoría de la penetración, se obtienen expresiones típicas de estos coeficientes.

$$k_g = \left(\frac{2}{RT} \right) \left(\frac{D_g}{t_g} \right)^{1/2}$$

$$k_l = 2 \left(\frac{D_l}{\pi t_l} \right)^{1/2}$$

donde D es la difusividad del compuesto y t, los tiempos de contacto.

Sin embargo, para el diseño, se acude normalmente a la teoría que desarrolla el Número de unidades de transferencia, que para casos diluidos es :

$$N_{OG} = \int_{P_O}^P \frac{dp}{p - Hx} = \frac{K_{OG} a Z p}{G}$$

donde: a, es la superficie específica y Z, la altura del equipo lavador.

Considerando constante L/G y H, se puede integrar la expresión anterior, representándose gráficamente la solución en la Figura 2.10.2., donde se representa la eficacia de transferencia en la fase gas, y el número de unidades de transferencia para contactos en isocorriente y contracorriente, en función de HG/PL. La zona económica de operación suele ser la comprendida entre las abscisas 0'5 y 1'0 (para contracorriente), siendo aconsejable trabajar con rendimientos del 95%. No obstante, el diseño real, dependerá de un balance económico entre el costo de la torre y las potencias de trasego del gas y el líquido a través de la misma.

Cuando existe reacción química entre el contaminante a separar y el líquido de lavado, el desarrollo anterior se ve modificado, siendo :

$$N_{OG} = \int_{P_O}^{P_i} \frac{dp}{p} = \ln \frac{P_i}{P_O}$$

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2 / 148.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	10	CAPITULO: DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA.	01	10	80.

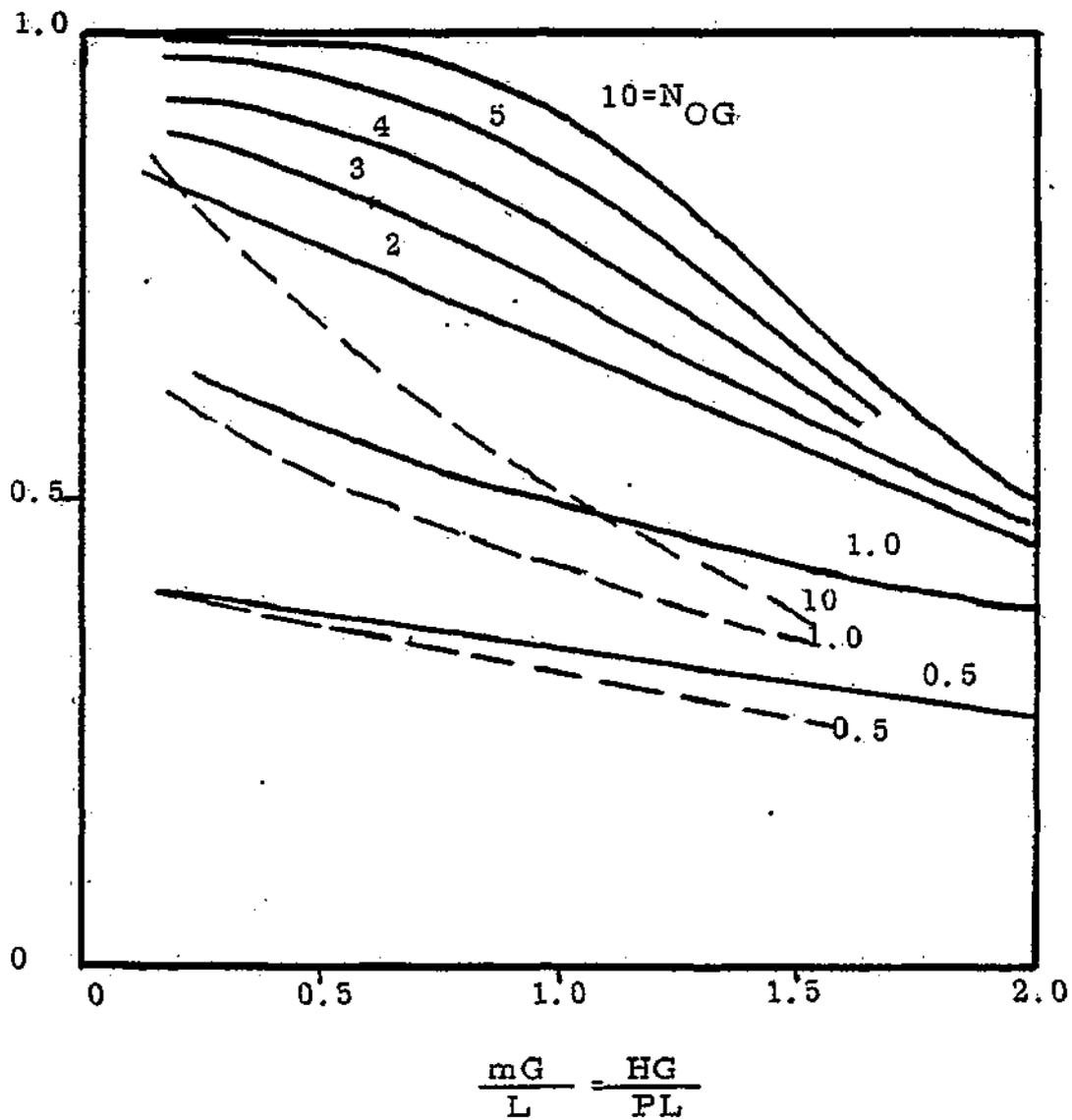


Figura. - 2.10.2.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2 / 149		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	10	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10	80

Cuando ésto tiene lugar, se consiguen dos efectos beneficiosos, de un lado, se reduce el número de unidades de transferencia necesarias y de otro, la altura de cada unidad, con lo que las dimensiones del equipo se ven considerablemente disminuidas.

10.3. SEPARACION DE MATERIA PARTICULADA

La separación de partículas en los scrubbers obedece a uno o más de los fenómenos que se dan en otro tipo de equipos separadores de materia particulada. La finalidad del líquido, es facilitar la superficie de deposición y humedecer el sólido adherido a las superficies.

Las relaciones entre el rendimiento de separación de partículas y los parámetros de diseño, se pueden predecir a partir del estudio de las operaciones unitarias involucradas en el proceso. La relación entre el rendimiento y el tamaño de partícula (a menudo llamada curva gradual de rendimientos), se puede integrar a partir de la influencia de la distribución de tamaños en el rendimiento global. Como alternativa se puede utilizar un método teórico, para predecir con rapidez el rendimiento de un scrubber.

10.3.1. Mecanismos

Los mecanismos básicos de separación de partículas, arrastradas por una corriente gaseosa, son :

- 1) Sedimentación por gravedad: Este mecanismo, normalmente es de poca importancia, pues sus efectos son mínimos para partículas de pequeño tamaño, que es donde encuentran su mayor utilización este tipo de equipos.
- 2) Deposición por fuerza centrífuga: Tiene lugar cuando la corriente gaseosa se somete a cambios de dirección. Los cambios de dirección suaves, como ocurre en los ciclones, no son muy efectivos para partículas de $dp \leq 5 \mu$, de aquí que los cambios de dirección a que se somete la corriente gaseosa en el interior de los scrubbers sea de mayor violencia.
- 3) Impacto por fuerzas de inercia e intercepción: Cuando la corriente gaseosa fluye alrededor de un objeto pequeño, las fuerzas de inercia de las partículas, hacen que éstas sigan su trayectoria, a pesar de la distorsión de las líneas de corriente por el objeto interpuesto (prácticamente es análogo a la separación por fuerza centrífuga). El impacto por inercia estudia a pequeña escala, los efectos del cambio de dirección del flujo portador de materia particulada.
El impacto por fuerzas de inercia, es efectivo para partículas de diámetro de décimas de micra. Es el mecanismo de separación más utilizado en los scrubbers de materia particulada. Este mecanismo, recoge en el concepto de inercia de la partícula, su tamaño y su densidad, factores determinantes de su mayor o menor dificultad de separación.
- 4) Difusión browniana: Cuando las partículas son suficientemente pequeñas (menores de 0.1μ de diámetro), siguen las líneas de corriente rodeando el objeto interpuesto, llegando a comportarse como las moléculas gaseosas. Por tanto, se difunden a través del gas como consecuencia de su movimiento browniano. En general, el impacto por inercia y la difusión browniana, son los dos mecanismos fundamentales que se dan en los scrubbers de materia particulada.
- 5) Termoforesis: Si hay transferencia de calor desde el gas al líquido, habrá un gradiente de temperatura y las partículas finas circularán hacia la superficie fría, mediante bombardeo molecular diferencial, mientras que exista gradiente. Este mecanismo separador es raramente importante en un scrubber.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA, 2.2. / 150		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	10	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10	80

6) Difusionforesis: La transferencia de masa dentro del scrubber (como puede ser la que tiene lugar al condensar vapor de agua del gas, sobre la superficie del líquido frío) ejerce una fuerza sobre las partículas que arrastra la corriente gaseosa, que las hace depositarse sobre la superficie líquida. Esta deposición puede ser importante, siendo la fracción de partículas separadas aproximadamente igual a la fracción de la corriente gaseosa condensada.

7) Precipitación electrostática: Si se induce una carga electrostática sobre las partículas, éstas pueden precipitarse desde la corriente gaseosa, por influencia del gradiente de cargas. Este mecanismo, puede ser efectivo para todos los tamaños de partículas, y se puede lograr una alta eficacia de separación a partir de él.

8) Crecimiento de partículas: Si bien no es un mecanismo de separación en sí mismo, el aumento de masa en las partículas por tal procedimiento (tal como puede ser condensando una partícula de agua alrededor de la partícula), las hace más susceptibles de separación por acción de las fuerzas de inercia (impacto). Este mecanismo, junto con la difusionforesis, puede tener lugar en los scrubbers donde se produce la condensación.

La combinación de todos los mecanismos, se denomina como "fuerza de flujo/condensación" (F/C), en la separación, por lavado de gases, de la materia particulada:

10.3.2. Criterios de separación

Todas las propiedades importantes de las partículas, desde el punto de vista de separación, se pueden recoger en un solo parámetro, el diámetro aerodinámico de la partícula, definido como :

$$d_{pa} = d_p (\rho_p C)^{1/2}$$

donde:

d_{pa} = diámetro aerodinámico (μ)

d_p = diámetro físico (μ)

C = factor de corrección de Cunningham

Por coincidencia, la mayoría de los métodos de medida de tamaños en partículas (tales como el impactador de cascada), obtienen el diámetro aerodinámico de las mismas, sin embargo, nunca se deben perder de vista el tamaño físico de las partículas (d_p) y su densidad (ρ_p).

Para el impacto por inercia, el procedimiento más común de separación de materia particulada en los scrubbers, se utiliza el diámetro aerodinámico, que sirve como base para definir el "diámetro de corte", concepto que se utiliza para predecir el rendimiento. Está basado en la idea de que es el parámetro más simple y significativo para definir la dificultad de separación, definiéndose como el diámetro de partícula para el cual el rendimiento de separación es del 50%.

Cuando se ponen en juego otros mecanismos de separación, son más significativas otras propiedades de las partículas, pero ello sólo ocurre cuando el tamaño de partícula (d_p) es inferior a 1μ .

Normalmente, existe un rango de tamaños de partículas en la corriente contaminada, definiéndose el rendi-

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 151		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	10	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10	80

miento de separación global, que depende de la cantidad presente para cada tamaño y el rendimiento de separación para ese tamaño, en función del diámetro de corte. Este diámetro de corte, d_{RC} , depende de la penetración total, \bar{P}_t , y de los parámetros de distribución de tamaños.

En las emisiones industriales de materia particulada, la distribución de pesos y números de partículas, en función del tamaño, siguen una ley logarítmica normal.

La distribución de tamaños, queda definida mediante el diámetro medio (en peso) d_{pg} y la desviación geométrica standard σ_g .

La penetración o fracción de materia que atraviesa el scrubber, para muchos tipos de colectores en los que predominan las fuerzas de inercia, se puede expresar como :

$$P_t = \exp(-A d_{pa}^B) = 1 - \eta$$

La penetración global \bar{P}_t , de cualquier equipo separador de materia particulada, y para cualquier tipo de distribución, se define como :

$$\bar{P}_t = \int_0^w \left(\frac{dw}{w}\right) P_t$$

Se trata de la integral del producto de cada fracción en peso de polvo, por la penetración del equipo para esa fracción. Esta ecuación, está resuelta para una distribución de tamaños logarítmica normal, recogiendo gráficamente en la Figura 2.10.3. En ella, se recoge \bar{P}_t , frente a $(dp_{50}/dp_g)^B$, con $B \ln(\sigma_g)$ como parámetro. Para un \bar{P}_t requerido, se puede calcular el valor del diámetro de corte, d_{RC} , cuando se conocen d_{pg} , σ_g y se ha fijado un determinado equipo con su correspondiente B.

10.4. TIPOS DE EQUIPOS DE LAVADO

Existe una gran variedad de posibilidades para conseguir un buen contacto entre el gas y el líquido, si bien se pueden resumir en dos grandes familias; las que el gas se dispersa en el seno de un líquido continuo y viceversa.

El caso más simple, sería el burbujeo del gas en un recipiente de líquido, el contacto se puede facilitar mediante agitación mecánica, o mediante baffles que hagan zigzaguear el líquido, caso del relleno o platos en las torres, todo ello facilita el contacto, introduciendo fuerzas centrífugas en las partículas que acompañan al gas.

El líquido, disperso en forma de gotas que se mueven a través del gas, sería el caso más simple de la segunda familia, también aquí se puede favorecer el contacto mediante agitación mecánica y usando baffles o rellenos.

Generalmente, el líquido es una fase simple, pero se pueden usar también una suspensión de reactivos químicos o partículas insolubles, conservando las ventajas de manipular fluidos.

Algunos scrubbers se diseñan con el fin primordial de separar materia particulada, y otros para transferen-

cia de masa de un contaminante gaseoso. Sin embargo, tanto para unos como para otros, se necesita un buen contacto de las dos fases, la líquida y la gaseosa contaminada, igualmente ambos tienen capacidad para retener, tanto materia particulada como gases. Las características de rendimiento para uno y otro tipo de contaminantes, determinará un gran factor en la elección de un determinado equipo para resolver un problema concreto.

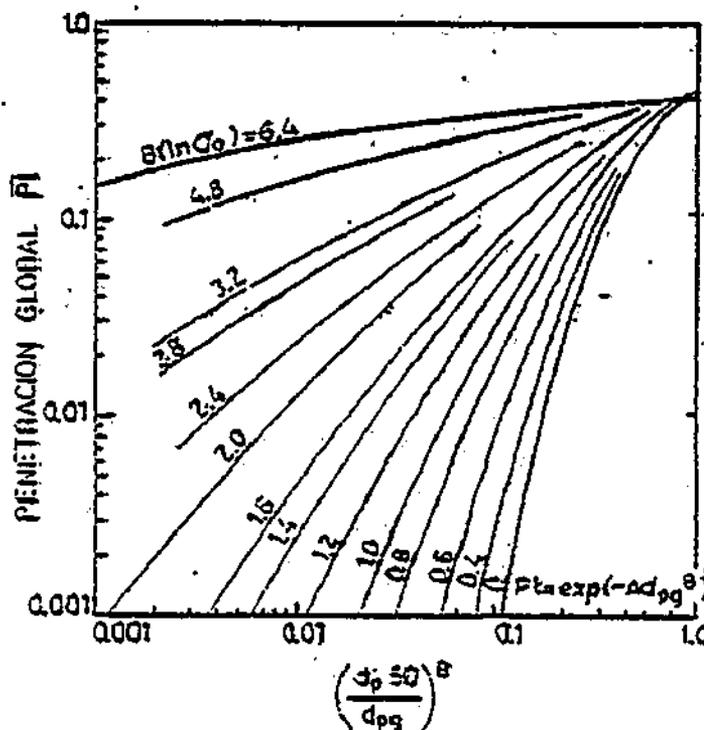


Figura. - 2.10.3. - Penetración global en función del diámetro de corte. Parámetros de las partículas y características del colector.

Se puede hacer una clasificación global, que intente agrupar en familias, los diversos equipos que existen en el mercado, reuniéndolos por similitud de características y fundamentos en los siguientes grupos: Torres rellenas, torres de platos, torres de pulverización, equipos ciclónicos, equipos de atomización, equipos de impacto y arrastre, y equipos de diseño combinado.

Las torres rellenas (Figura 2.10.4.), son los equipos más utilizados para la absorción, debido a la superficie de contacto entre fases que suministran. Los materiales de relleno tienen diseños muy variables, que van desde anillos, monturas y esferas, hasta las fabricaciones de baja densidad con metales expandidos, tamices y fibras. Este diseño trabaja muy bien para materia particulada líquida, teniendo para sólidos los problemas derivados de la obturación del lecho.

Las torres de platos, (Figura 2.10.5.), son equipos típicos de fase gas dispersa, existiendo diversas formas de dispersión, tales como campanas de borboteo, platos perforados y variaciones incorporadas a cada

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERÍA AMBIENTAL	HOJA 2,2../153		
	3	TEMA : CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	FECHA		
E.O.L. MINER	10	CAPÍTULO : DEPURACIÓN DE GASES POR VÍA HUMEDA	01	10	80

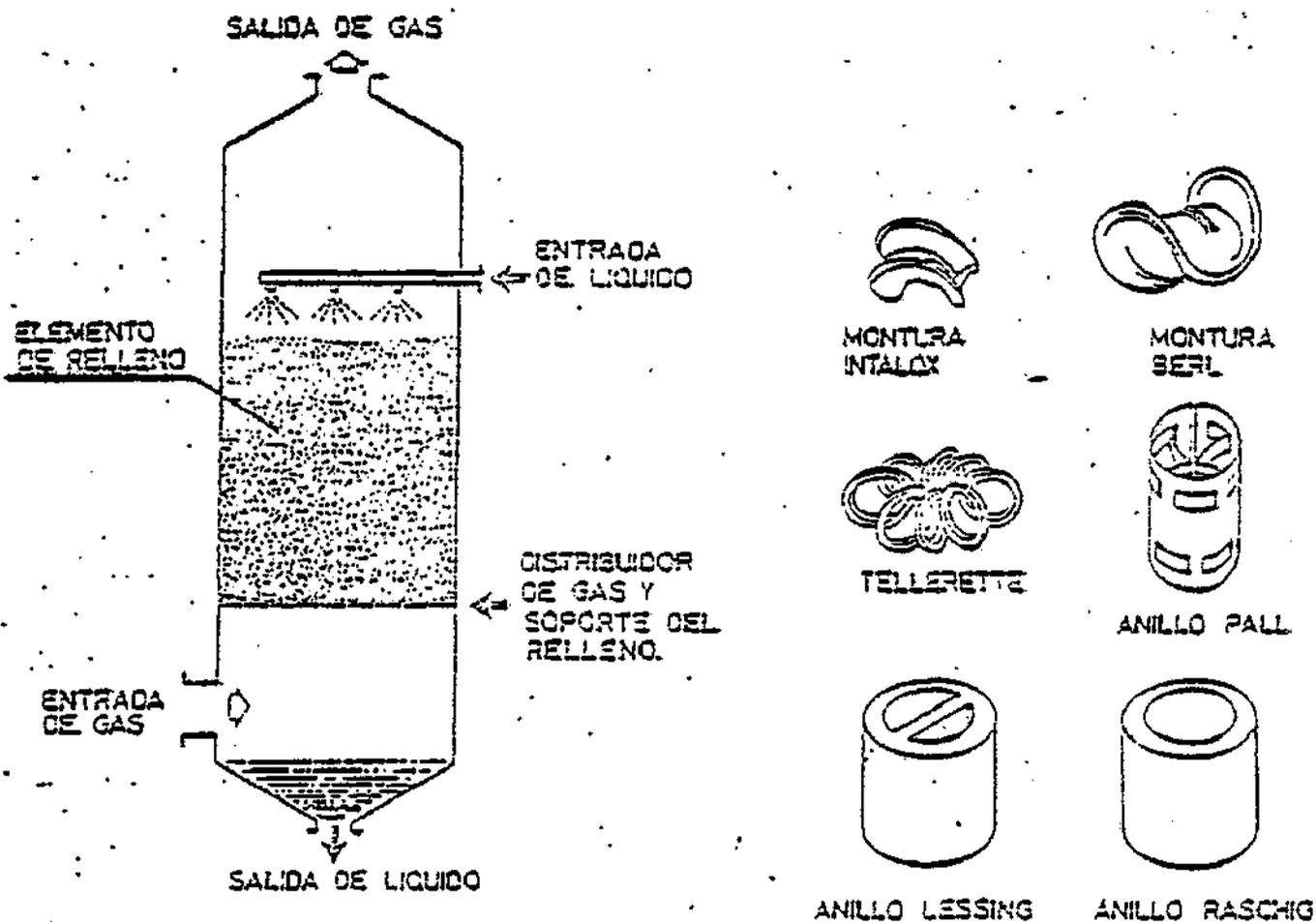


Figura. - 2.10.4. - Torre rellena y Anillos.

modalidad. Durante la operación, el gas somete al líquido a una agitación violenta, formando espumas más o menos densas en la superficie de cada plato. Este tipo de unidades, producen gotas a medida que el gas pasa por el líquido, utilizándose con frecuencia baffles sobre los que impactan.

Las torres de pulverización o spray (Figura 2.10.6.), se basan en la transferencia del contaminante (gases o partículas) a las gotas de líquido, pues el gas fluye a través de una niebla líquida que desciende en forma de gotas, producidas en las boquillas de pulverización.

Sus aplicaciones suelen ser mejores para materia particulada, que para gases.

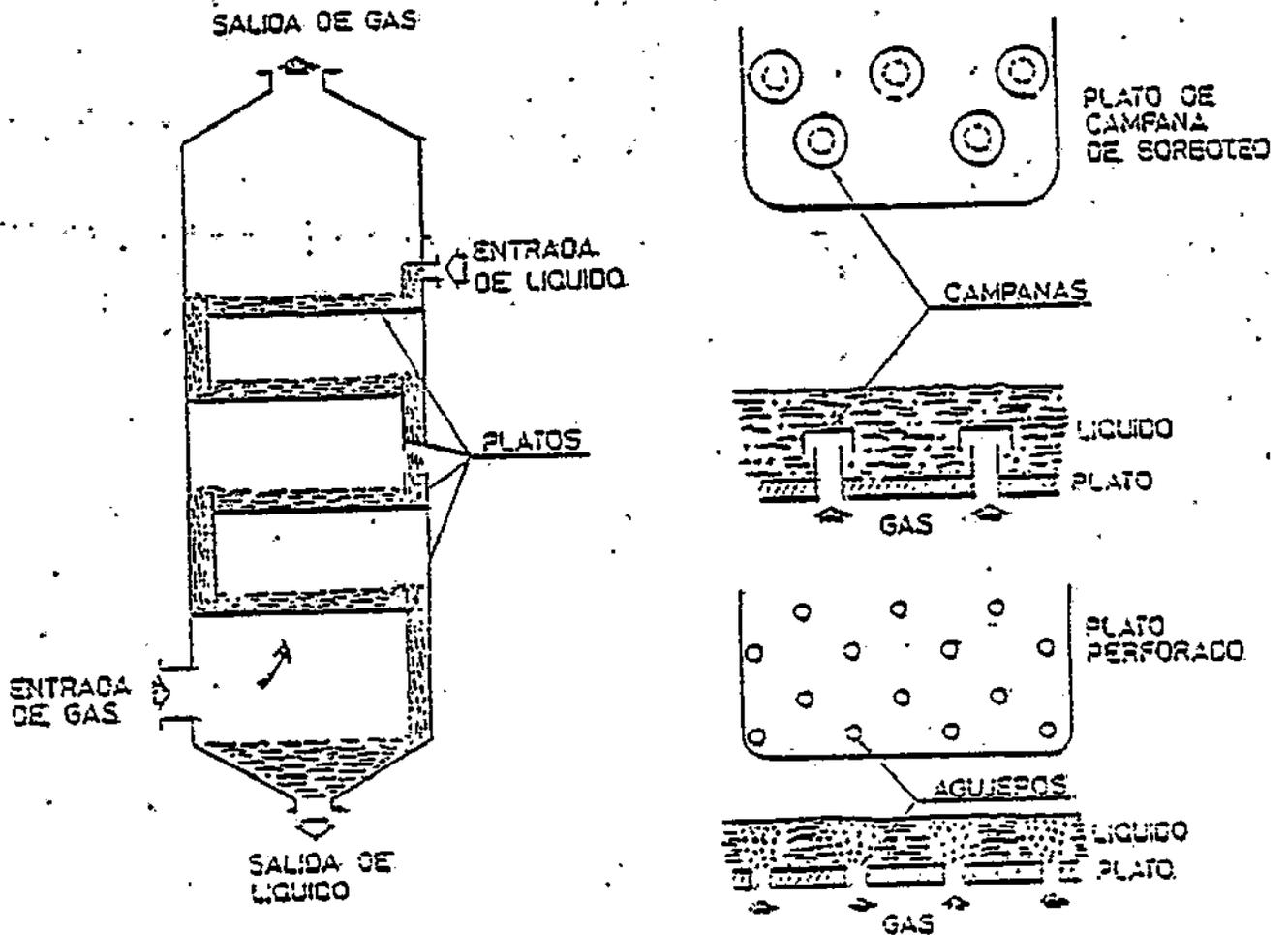


Figura. - 2.10.5. - Torre de platos y platos.

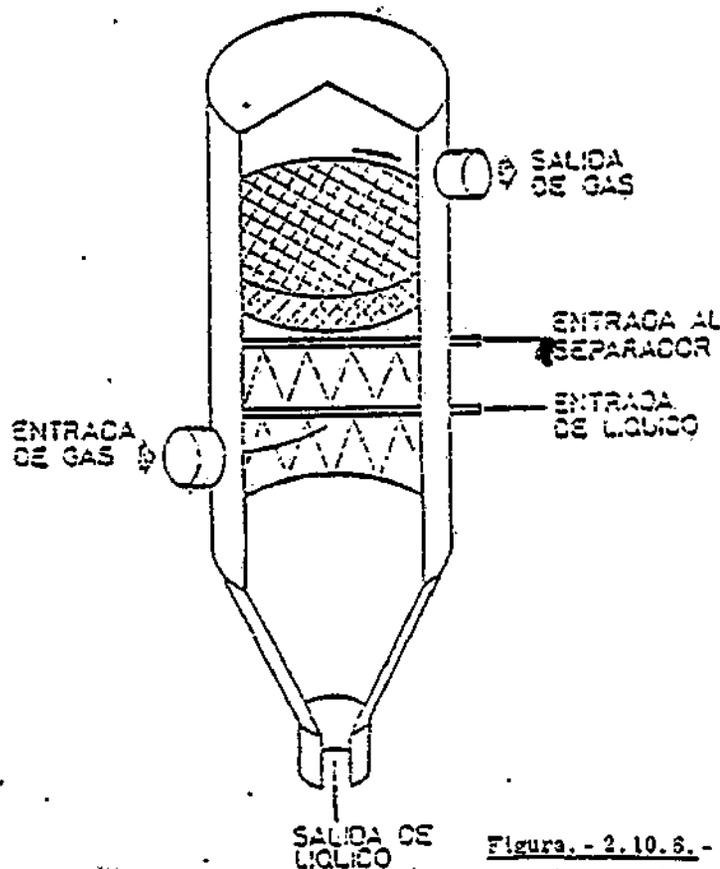


Figura. - 2.10.6. - Torre de Spray.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : ENGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 155		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	10	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10	80

Los equipos ciclónicos tienen un buen rendimiento, por impartir una aceleración centrífuga al flujo de gas, produciendo gotas líquidas muy finas, combinando los principios de separación de los scrubbers con la separación ciclónica de las gotas líquidas.

Los equipos de atomización, aunque incluyen a los anteriormente expuestos de pulverización, se reserva el nombre para aquellos equipos, tales como orificios venturi (Figura 2.10.7.), de disco de autoinducción (Figura 2.10.8.) etc., en los que la atomización del líquido o las corrientes del gas a alta velocidad, producen nieblas de muy fino tamaño, consiguiéndose buenos rendimientos en espacios físicos relativamente reducidos, a costa de una elevada energía.

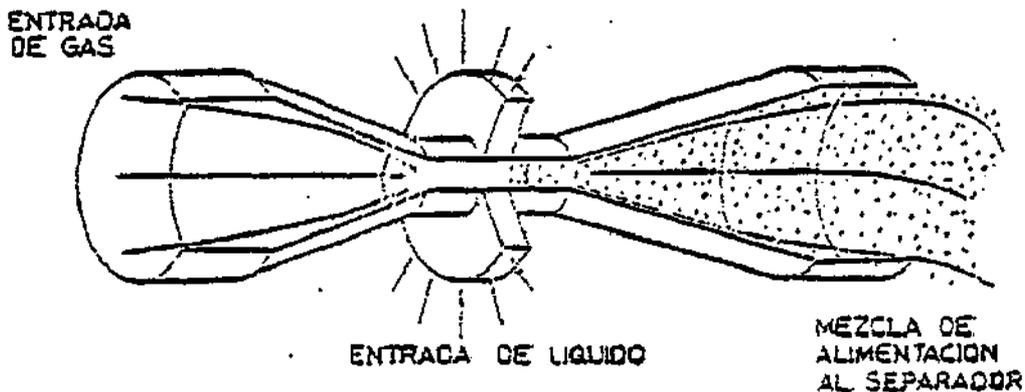


Figura. - 2.10.7. - Venturi.

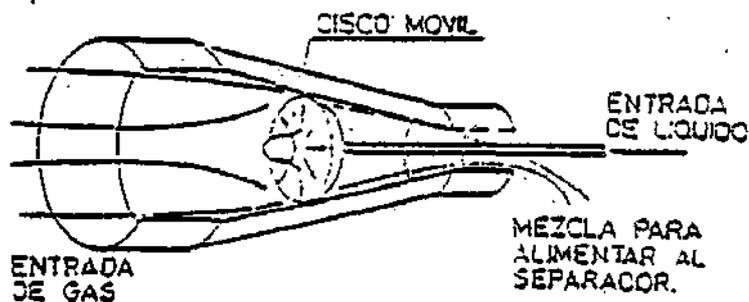


Figura. - 2.10.8. - Disco autoinducido.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 156		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	10	CAPITULO :	DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10	80

Los equipos de impacto y arrastre (Figuras 2.10.9. y 2.10.10.), se basan en el choque de la corriente gaseosa sobre el líquido. Este contacto atomiza parte del líquido en gotas, que servirán como separadores de partículas y superficie de transferencia de masa, siguiendo a continuación caminos más o menos tortuosos que facilitan la separación.

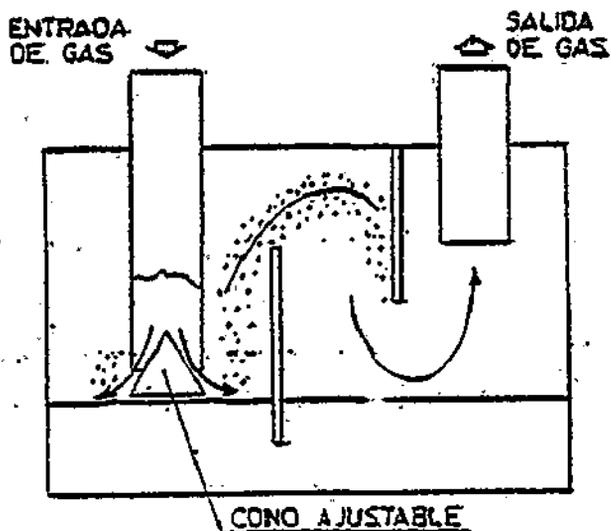


Figura. - 2.10.9. - Scrubber de impacto.

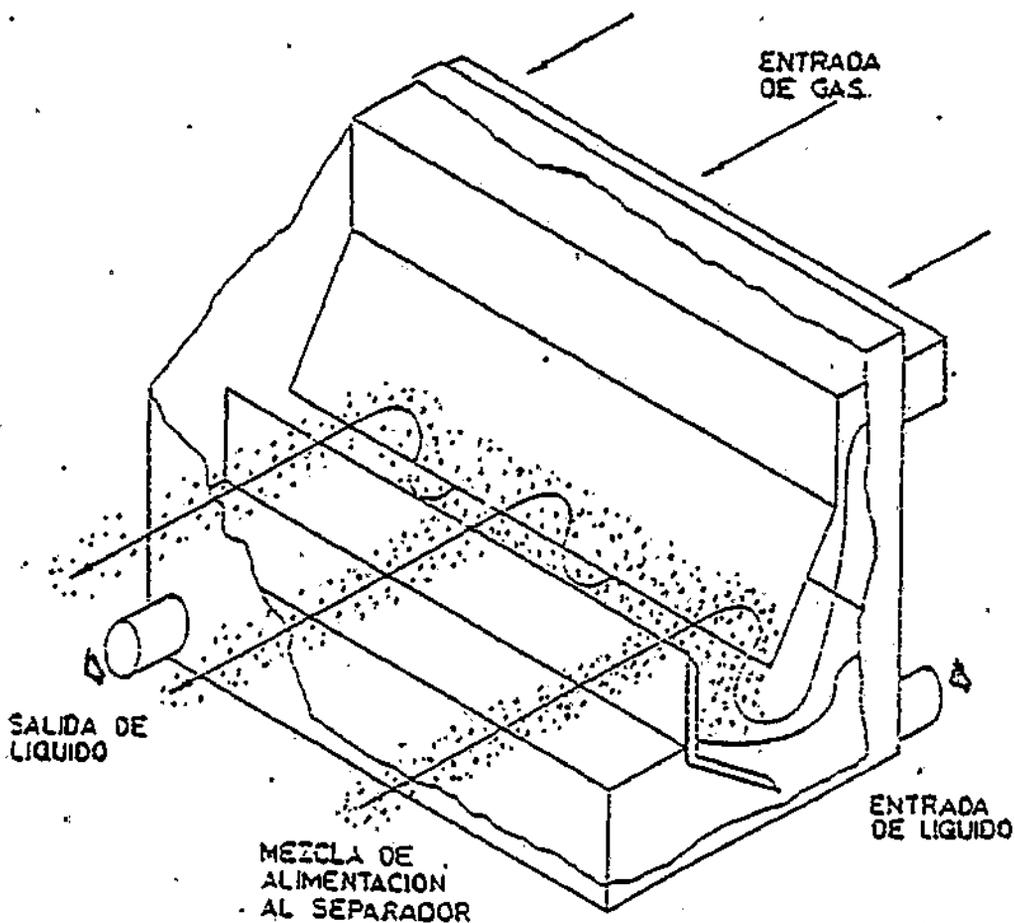


Figura. - 2.10.10. - Scrubber autoinducido.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 157		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	10	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10	80

Finalmente, se reserva una parcela, para aquellos diseños específicos, desarrollados por casas comerciales, en los que se superponen distintos scrubbers individuales en uno de acción múltiple, pero que puede ser estudiado, a partir del conocimiento individual de cada una de las partes que lo forman.

10.5. CAPACIDAD Y NECESIDADES DE ENERGIA

La capacidad del scrubber, está limitada de un lado por el flujo de gas para el cual el líquido arrastrado por la corriente gaseosa llega a ser excesivo, y de otro, por el punto en el cual tiene lugar la inundación.

Se requiere que el tamaño de las gotas sea lo suficientemente pequeño, y el caudal de gas lo suficientemente alto como para que las gotas sean arrastradas por la corriente gaseosa. Si las gotas se suministran a la corriente gaseosa formadas previamente, como sucede en un spray, se pueden predecir las condiciones de funcionamiento, a partir de la dinámica de gotas. Cuando las gotas no están inicialmente presentes, o cuando la velocidad de gas es lo bastante alta como para romper las gotas grandes, se deben considerar los procesos de atomización. La estabilidad de las gotas se predice a partir del valor crítico del número de Weber, que es donde tendrá lugar la rotura de las mismas.

La energía requerida para separar materia particulada, es función de la pérdida de carga de la fase gaseosa, existiendo relaciones empíricas entre el grado de penetración y la potencia que se ha de suministrar al equipo (Figura 2.10.11.) para una distribución determinada de tamaños de partícula.

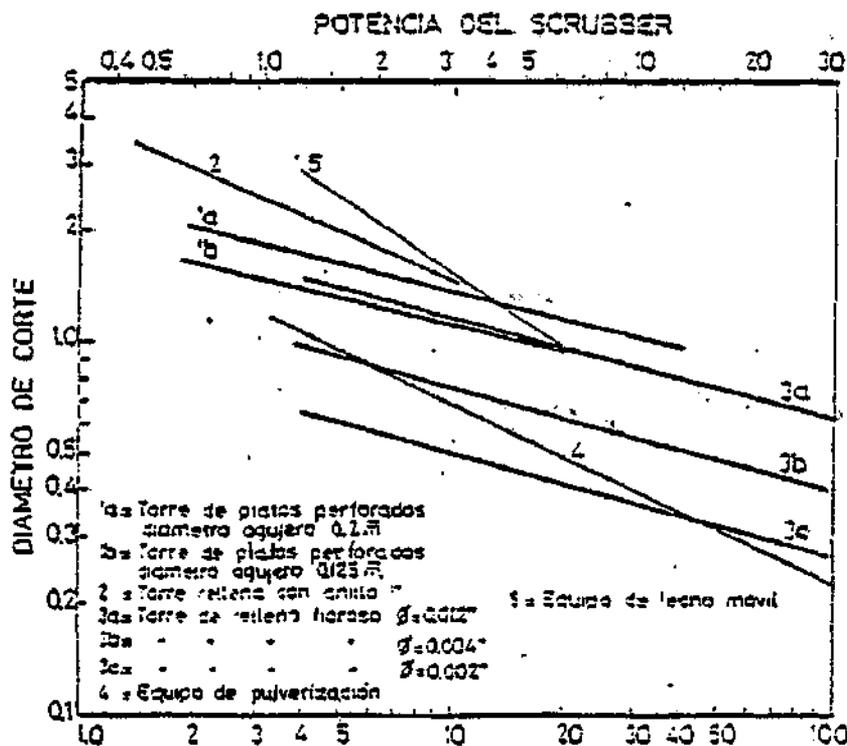


Figura. - 2.10.11. - Caída de presión en la fase gas en H₂O

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./158		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	10	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10	80

La caída de presión del flujo gaseoso que atraviesa el scrubber, es debida a la fricción con las superficies estacionarias y la aceleración del líquido. Las pérdidas por fricción, dependen de la geometría del scrubber y, generalmente, se determinan experimentalmente. Las pérdidas por aceleración, no dependen de la geometría, y frecuentemente son la causa predominante de la caída de presión.

Se puede utilizar la Ley de Newton, para calcular la fuerza necesaria, para cambiar el momento del líquido a un caudal determinado.

$$F_a = \frac{d(Mv)}{g_c dt} = \Delta P_a A$$

Si el líquido se introduce a velocidad v_c , en la dirección del flujo gaseoso, y finalmente alcanza la velocidad del gas v_g , se tiene :

$$P_{a1} = \frac{(v_g - v_c)}{g_c} \frac{dM}{dt} \propto 5 \times 10^{-5} (v_g - v_c)^2 L$$

donde :

ΔP_a = Caída de presión en pulgadas de H_2O .

v_c y v_g = Velocidades en pies por segundo.

L = Caudal de líquido en miles de pies cúbicos.

10.6. SELECCION DE EQUIPOS

El criterio de selección, igual que para cualquier otro equipo industrial, es el óptimo económico. Se puede decir que un equipo es mejor que otro, cuando suministrando ambos el rendimiento requerido (factor de penetración y diámetro de corte), los costos de uno de ellos son inferiores a los del otro, si bien al utilizar la palabra costo, se necesita tener en cuenta el precio del equipo, consumo de potencia, los costos de mantenimiento, etc., todo ello ponderado convenientemente conduce al concepto de costo total del equipo en cuestión.

Como orientación, se recogen los costos promedios de este tipo de equipos, desglosados en diversos conceptos :

- 1) Costo del equipo en sí.
- 2) Coste de instalación, aproximadamente 1'43 el coste del equipo.
- 3) Los equipos de bombeo, suponen entre el 30 y el 60% del costo del equipo instalado (incluyendo el punto 2)
- 4) La instrumentación varía entre el 3 y el 20% del costo instalado, en función del grado de automatización elegido.
- 5) Los gastos varios pueden oscilar entre el 30 y el 115%, a lo que se deben sumar gastos de ingeniería y contingencia.

Como idea de aproximación, se puede estimar, que para procesos que entrañan manipulación de fluidos, como sucede en el caso de los scrubbers, el costo total del equipo puede llegar a suponer 4'75 veces el costo de factura del fabricante.

Con idea de suministrar un mayor número de datos, se recogen una serie de generalidades, válidas para un prediseño :

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 159		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. M I N E R	10	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10	80

- 1) El costo del equipo auxiliar varía aproximadamente con el exponente 0'6 de la capacidad.
- 2) El costo del scrubber varía aproximadamente con el exponente 0'7 de la capacidad.
- 3) El costo varía con el material a emplear, utilizando como 1'0 el acero al carbono, sería 1'4 para cobre, 1'5 para aluminio, 1'6 para plomo, 2'3 para inoxidable 304, 2'7 para inoxidable 316 y 3'0 para níquel.

Existen tablas que estiman valores en precio, en función de los tipos de equipos y su capacidad, si bien la inflación actual desaconsejan su inclusión en este tema, considerándose de mayor utilidad la consulta a fabricantes con precios actualizados.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 169		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

11.1. PRINCIPIOS GENERALES

La adsorción es un proceso por el que determinadas moléculas contenidas en un fluido -líquido o gas- quedan retenidas sobre la superficie de un sólido. Se basa en la fuerza de atracción que existe entre la superficie - del sólido y las moléculas adsorbidas. Las fuerzas de atracción pueden ser de dos tipos : adsorción física o de "Van der Waals" y adsorción química, o quimisorción. La magnitud de la fuerza varía tanto con la naturaleza del sólido o adsorbente, como con la del compuesto a fijar o adsorbato, y es precisamente la que diferencia los dos tipos de adsorción.

Así, la adsorción física surge como consecuencia de la existencia de fuerzas de atracción intermoleculares entre las moléculas del adsorbente y del adsorbato. Esto hace que pueda quedar retenido sobre un sólido un vapor cuya presión sea inferior a la de saturación. Este proceso de condensación va acompañado de un desprendimiento de calor, algo mayor que el correspondiente calor de vaporización. La sustancia adsorbida, no penetra en la red cristalina del sólido, ni se disuelve en él, sino que permanece sobre su superficie.

Las fuerzas de quimisorción son el resultado de la interacción química entre el sólido y la sustancia adsorbida. Son de mayor entidad que las debidas a una adsorción física y el calor liberado durante este proceso es, normalmente, del orden del calor de reacción. El proceso es irreversible en muchas ocasiones, por lo que es muy importante en catálisis. Se ha visto, pues, para los dos tipos de adsorción, que este proceso es exotérmico.

En este tema, se tratará la adsorción, exclusivamente, desde la perspectiva del estado gaseoso constituyen do un buen sistema para controlar la calidad de las emisiones debido a la posibilidad de concentrar los contaminantes gaseosos, facilitando su recuperación o conversión a productos valiosos o inocuos.

El material adsorbido puede ser muy reactivo actuando entonces el adsorbente como un verdadero catalizador. En algunos casos, puede incorporarse al adsorbente algún compuesto especialmente seleccionado que aumente el rendimiento del proceso de adsorción. Se dice, entonces, que el adsorbente está impregnado. Esta impregnación aumenta la velocidad, capacidad o selectividad del adsorbente.

La cantidad de sorbato que pueda adsorberse por un peso determinado de adsorbente depende de los siguientes factores :

- 1) Concentración del sorbato en la corriente gaseosa próxima al adsorbente.
- 2) Area total superficial del adsorbente.
- 3) Temperatura.
- 4) Presencia de otros compuestos que puedan interferir.
- 5) Características de las moléculas del adsorbato (peso, polaridad eléctrica, actividad química, tamaño y forma).
- 6) Microestructura de la superficie adsorbente, especialmente el tamaño y forma de sus poros.
- 7) Naturaleza química de las superficies adsorbentes, incluyendo su polaridad eléctrica y su actividad química.

La velocidad neta de adsorción de un compuesto depende de la velocidad con la que las moléculas del sorbato alcanzan la superficie adsorbente, depende también de la fracción de estas moléculas que están en contac

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2, / 151		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

to con las adsorbidas, así como de la velocidad de eliminación de las moléculas (velocidad de desorción). Para lograr unas buenas condiciones de adsorción, el equipo adsorbente debe diseñarse sobre la base de una adecuada duración del contacto (tiempo de retención) entre la corriente gaseosa a purificar y el adsorbente, y de una capacidad de retención del adsorbente por el adsorbato suficiente.

La eliminación de los gases y vapores contaminantes adsorbidos se efectúa por uno de los siguientes caminos :

- 1) Desecho del adsorbente con el adsorbato.
- 2) Desorción del adsorbato y posterior recuperación o eliminación del mismo.
- 3) Oxidación del adsorbato sobre la superficie del adsorbente y la subsiguiente recuperación de éste, si no ha sido también oxidado.

11.2. SUSTANCIAS ADSORBENTES

11.2.1. Generalidades

La capacidad de adsorción de los sólidos es un fenómeno muy general, si bien sólo algunos de ellos son utilizables desde el punto de vista industrial, debido fundamentalmente a la selectividad que presentan ante un determinado sorbato. Estos sólidos deben poseer ciertas propiedades función de su utilización. Así, su constitución, tamaño, naturaleza y dureza serán distintas si se van a utilizar en lecho fijo o en lecho fluido.

El parámetro fundamental que define el comportamiento del adsorbente adecuado a un sorbato es su superficie por unidad de peso debido, precisamente, a que la adsorción es un fenómeno que se produce sobre la superficie, tanto exterior como interior, de la partícula. Un kilogramo de carbón activado puede tener una superficie efectiva de un millón de metros cuadrados.

A continuación, se tratarán algunas características de los adsorbentes más utilizados.

11.2.2. Carbón activado

El carbón activado o carbón activo, consiste en partículas de carbón convenientemente tratadas (proceso de activación) que presentan una gran superficie por unidad de peso o volumen de sólido. Entre las materias primas utilizadas se incluyen las cáscaras de coco, los huesos de frutas, serrín, maderas duras y residuos de petróleo. Para minimizar el roce mecánico, las partículas deben ser duras y su tamaño debe ser tal, que supongan una pequeña resistencia al flujo para una determinada eficacia de adsorción. El tipo y estructura del microporo de la superficie del carbón, es de capital importancia. La distribución de los diámetros de poro está determinada, también, tanto por la naturaleza de la materia prima, como por el proceso de activación. Los distintos carbones difieren en estas características por lo que su comportamiento puede ser diferente. Cuando se utiliza el carbón activado como lugares activos para la oxidación de los contaminantes, hay que prestar atención a su temperatura de inflamación. Al aumentar ésta, menos propenso será el carbón a desgastarse por oxidación.

El carbón activado presenta una distribución homogénea de carga eléctrica en su superficie. Está especialmente indicado para la eliminación de vapores orgánicos en un rango de concentraciones comprendido entre 50 y 3.000 ppm. Predominando en este caso la adsorción física. También se utiliza para la eliminación de otros contaminantes de tipo ácido (adsorción química).

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 162		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

Respecto a los primeros, algunos autores afirman que la única limitación la constituye que el peso molecular del vapor a eliminar sea superior al del aire, lo que ocurre siempre, exceptuando el caso del metanol.

La capacidad total de adsorción sobre carbón activado, se mide por su actividad o poder de retención para un vapor standard. La actividad es la máxima cantidad de vapor que puede adsorberse por un peso dado de carbón bajo determinadas condiciones de temperatura, concentración de vapor y concentración de otros vapores, normalmente agua.

El poder de retención, o retentividad, es la cantidad máxima de vapor adsorbido que puede retenerse en el carbón, después de que la concentración de vapor en la corriente gaseosa haya sido reducida a cero.

11.2.3. Otros adsorbentes

Todos los adsorbentes comercialmente importantes, distintos del carbón activado, son óxidos simples o complejos que presentan una distribución de carga eléctrica no homogénea a escala molecular y que, a diferencia del carbón activado, son polares. Su selectividad es considerablemente mayor que la del carbón activado, - siendo mayor su preferencia, asimismo, para moléculas polares. Como consecuencia, su campo de aplicación específico se extiende a separaciones entre diferentes tipos de contaminantes, siendo menor su utilización cuando se requiere una descontaminación global de la corriente gaseosa. En general, su aplicabilidad es menor que la del carbón activado.

- Adsorbentes silíceos

Comprenden la sílica gel, las tierras diatomeas y otras tierras silíceas, así como las zeolitas sintéticas o tamices moleculares.

Sus capacidades son del orden de las capacidades más elevadas del carbón activado, si bien su especificidad está centrada sobre la base de su preferencia hacia las moléculas más polares. Además, las zeolitas sintéticas pueden fabricarse con un diámetro de poro uniforme previamente fijado, lo que constituye una buena propiedad en cuanto a su especificidad para la adsorción de moléculas de determinado tamaño o forma.

Debido a su preferencia hacia moléculas polares, no adsorberán moléculas orgánicas desde corrientes húmedas, incluso cuando por su tamaño sean adsorbibles en principio.

- Adsorbentes en forma metálica oxidada

Son todavía más polares que los adsorbentes silíceos. Se utilizan como desecantes, portadores de catalizadores e, incluso, para control en la fuente de contaminantes por adsorción física. El ejemplo más corriente de este tipo de adsorbente es la alúmina activada (óxido de aluminio).

11.3. COMPUESTOS IMPREGNANTES

Los compuestos impregnantes se caracterizan por las siguientes acciones: Pueden actuar como un reactivo que convierte al contaminante en un producto inofensivo o, más fácilmente adsorbible. Asimismo, pueden ser catalizadores que, para los compuestos reaccionantes presentes (aire como gas portador y el propio contaminante), se limitan a intervenir en reacciones de oxidación y descomposición en forma continua. Por último, pueden ser también catalizadores, pero de actuación intermitente.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 163		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

Un ejemplo del primer tipo de acción lo constituye la impregnación con bromo para la adsorción de olefinas, de yodo para vapor de mercurio, de acetato de plomo para sulfuro de hidrógeno y de silicato de sodio para el fluoruro de hidrógeno. Como exponente del segundo tipo de acción, cabe citar la impregnación con cromo, cobre, plata, paladio y platino. Por lo general, se utilizan para contaminantes fácilmente oxidables (cloropiricinas) o inherentemente inestables (peróxidos y ozono).

Por último, se utilizan para impregnaciones del tercer tipo óxidos de cromo, molibdeno y tungsteno y se aplican para contaminantes que, en una primera etapa, se adsorben físicamente iniciándose, posteriormente, una oxidación catalítica superficial del sorbato captado.

11.4. EQUILIBRIO DE ADSORCION

11.4.1. Transferencia de un solo componente

Se explicará brevemente las características del equilibrio de adsorción derivadas de la existencia de una fase fluida gas con un solo componente o bien, cuando existiendo más de un componente, el sistema se comporta como una adsorción de vapor puro.

En la Figura 2.11.1., se representan algunas isotermas de adsorción de equilibrio sobre carbón activado representando la concentración del sorbato sobre el adsorbente frente a la presión parcial de equilibrio a la temperatura dada.

Hay que tener en cuenta que la adsorción física es un proceso reversible, desprendiéndose el gas o vapor adsorbido cuando su presión parcial en la fase gaseosa es inferior a la presión de vapor de la fase adsorbida. Sin embargo, la vía de desorción es distinta que la de adsorción, dándose un fenómeno de histéresis en el cual, la presión de equilibrio de desorción, es siempre inferior a la obtenida por adsorción (Figura 2.11.2.).

Al ser la adsorción un proceso exotérmico, la concentración del gas adsorbido disminuirá al aumentar la temperatura, para una determinada presión, como puede observarse en la Figura.2.11.1.

Otro parámetro a considerar es el calor de adsorción que, para un gas, es la suma del calor normal de condensación y del calor de humedecimiento.

El calor de adsorción se expresa como valor diferencial o integral. El calor diferencial de adsorción (\bar{H}) se define como el calor liberado a temperatura constante, cuando se adsorbe la unidad de masa de vapor o gas en una gran cantidad de adsorbente sobre el que ya existe una cantidad determinada del adsorbato. El calor integral de adsorción (ΔH), para cualquier concentración del adsorbato sobre el adsorbente, se define como la variación de entalpia por unidad de gas o vapor adsorbido, cuando se adsorbe éste sobre un adsorbente exento de adsorbato, hasta conseguir una concentración definida.

11.4.2. Transferencia de varios componentes

El fenómeno de adsorción es más complejo si el gas o vapor a adsorber, está formado por varios compuestos. Por lo general, éstos compuestos se adsorben en proporción inversa a su volatilidad relativa.

En un principio, los vapores se adsorben por igual, pero cuando aumenta la cantidad retenida de los componentes de mayor punto de ebullición, se revaporizan los más volátiles. Al final del proceso -tras alcanzarse

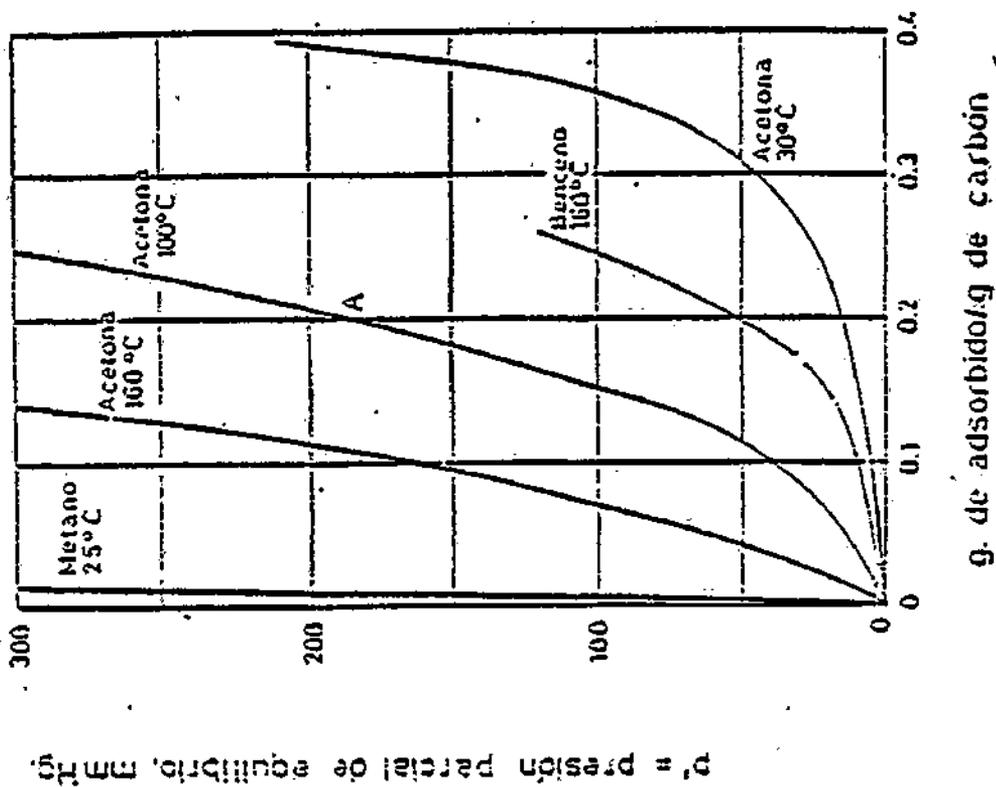


Figura. - 2.11.1. - Equilibrio de adsorción sobre carbón activo.

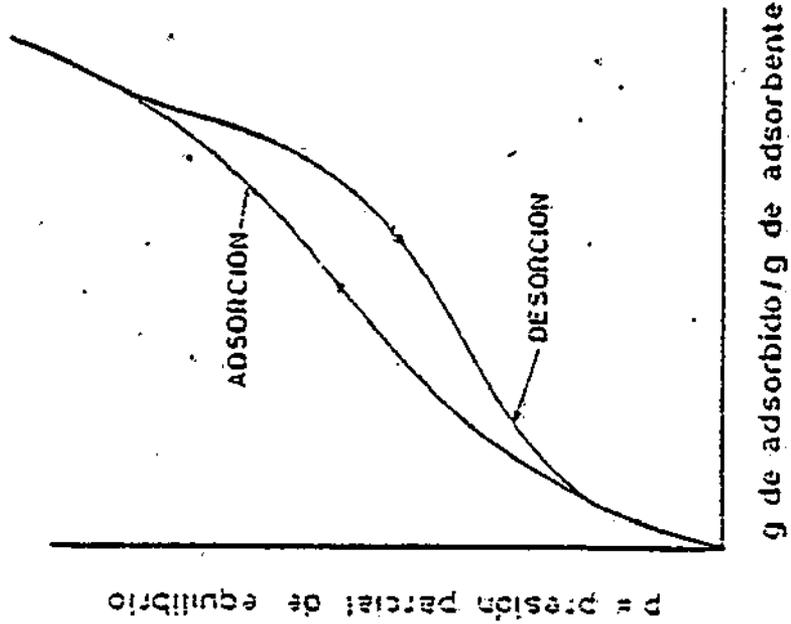


Figura. - 2.11.2. - Histeresis de adsorción

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 165		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E. O. I. MINER	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

el punto de ruptura, como se explicará más adelante- el vapor efluente está integrado principalmente por los constituyentes más volátiles, ya que el sorbato de mayor punto de ebullición, desplaza al que presenta un punto de ebullición inferior.

Esta propiedad, circunscrita esencialmente al carbón activado, es la base de la hipersorción, proceso utilizado en la separación de hidrocarburos de bajo punto de ebullición. Sin embargo, en la descarga de vapores orgánicos a la atmósfera, debe detenerse el ciclo de adsorción en el primer punto de ruptura.

Cuando se trate de un sistema de tres componentes, los datos de equilibrio se reflejarán en un diagrama ternario que deberá ser trazado para temperatura y presión total constantes.

11.5. OPERACIONES DE ADSORCION

Las técnicas utilizadas en las distintas aplicaciones de las operaciones de adsorción, como sistema de control de los contaminantes, incluyen tanto el contacto continuo como por etapas, en procesos de tipo continuo, semicontinuo o discontinuo. Algunas de estas operaciones son similares a otras ya descritas (Absorción).

Se tratarán a continuación las notas más diferenciadoras de las mismas.

11.5.1. Operación en etapas

En general, en las operaciones de adsorción sólido-gas en etapas, pueden incluirse dos tipos de procesos: los que conllevan la adsorción de un vapor de una mezcla gas-vapor, y los que suponen, para una mezcla de vapores, una adsorción selectiva y el subsiguiente fraccionamiento con la posibilidad, en el caso de control de la contaminación, de la adsorción de los distintos cortes producidos.

En el primer caso, si la adsorción es isotérmica, el cálculo del número de etapas se realiza gráficamente a partir de la recta de operación y la curva de equilibrio (isoterma de adsorción) procediendo de forma análoga al cálculo de las etapas para un equipo de absorción. Normalmente, la adsorción se lleva a cabo adiabáticamente lo que supone un proceso isotérmico. En este caso, el equipo se calculará etapa a etapa a partir de los balances de masa y energía. El procedimiento es, también, similar al de una absorción no isoterma.

En el segundo de los casos, de menor interés en el campo de la contaminación, ya que su utilización está centrada en el fraccionamiento de una mezcla de vapores, también existen métodos gráficos de resolución basados en la determinación de la recta de operación y la curva de equilibrio de forma análoga a los métodos empleados en contacto continuo.

11.5.2. Contacto continuo

Las operaciones de adsorción por contacto continuo se caracterizan porque el fluido gaseoso y el adsorbente se encuentran íntimamente unidos en todas las secciones del aparato. Las fases pueden estar ambas en movimiento, realizándose entonces la operación en régimen permanente, o por el contrario, el adsorbente se encuentra estacionario, lo que es más usual en los equipos es semicontinua y el régimen estacionario, lo que supone que las composiciones en el sistema varían con el tiempo.

En el primer tipo de contacto -lechos móviles- se pueden distinguir dos situaciones, según se adsorba un único componente (Figura 2.11.3.) o se realice un fraccionamiento de una mezcla de componentes gaseosos (Fi-

gura 2.11.4.).

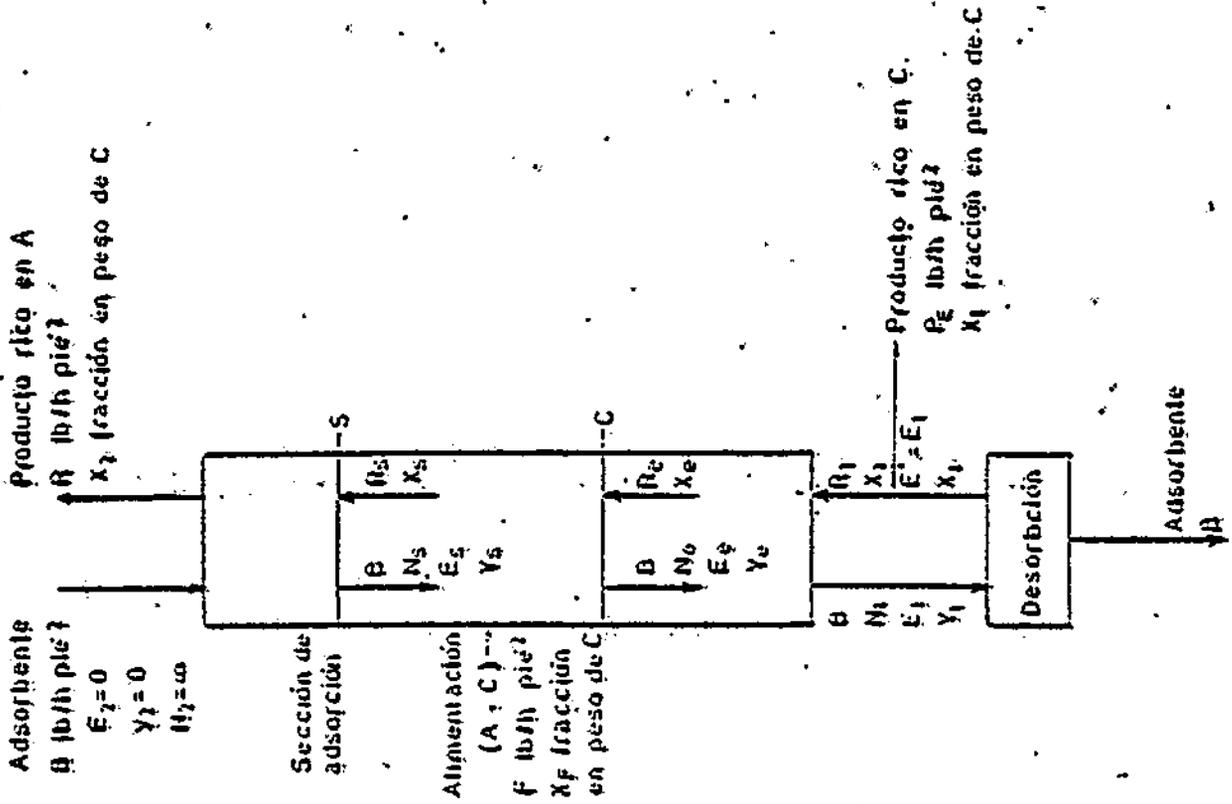


Figura. - 2.11.4. - Adsorción en régimen permanente de dos componentes.

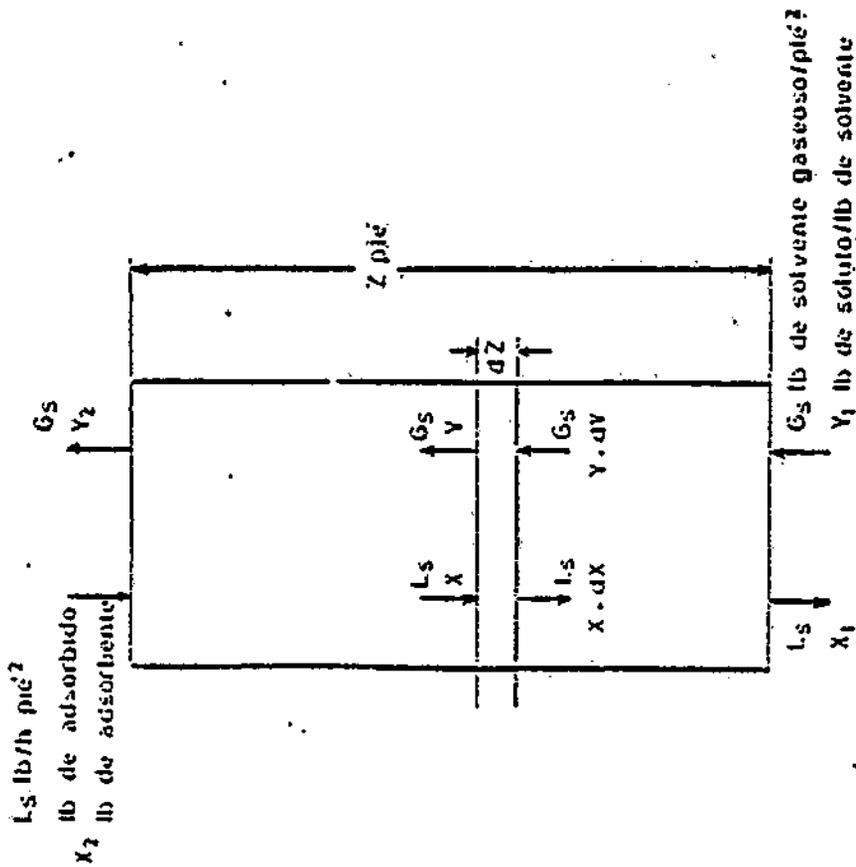


Figura. - 2.11.3. - Adsorción en régimen permanente de un componente.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2. / 167		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

Los cálculos que permiten el diseño físico-químico de la primera situación, son análogos a los utilizados para adsorción gas-líquido, llegando a la determinación de la altura (Z) requerida para proceder a una determinada adsorción, como consecuencia del cálculo de lo que se denomina número de unidades de transferencia - $(N)_{tog}$ y la altura global de la unidad de transferencia $(H)_{tog}$.

$$Z = N_{tog} H_{tog}$$

$$N_{tog} = \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{dY}{Y - Y^*}$$

$$H_{tog} = \frac{G_s}{K_y a_p}$$

siendo :

Y_1 = La concentración de adsorbato en la corriente gaseosa de entrada.

Y_2 = Idem. en la salida.

Y^* = La concentración del adsorbato en el gas en equilibrio, con la correspondiente concentración del adsorbato sobre el adsorbente (X).

G_s = La velocidad másica superficial de la corriente gaseosa libre de adsorbato.

K_y = Coeficiente global de transferencia de masa en la fase gaseosa.

a_p = Superficie exterior de las partículas sólidas.

También puede calcularse el valor de H_{tog} a partir de la expresión :

$$H_{tog} = H_{tg} + \frac{m G_s}{L_s} H_{ts}$$

siendo :

$$H_{tg} = \frac{G_s}{k_y a_p} \quad " \quad H_{ts} = \frac{L_s}{k_s a_p} \quad " \quad m = \frac{dy^*}{dx}$$

donde :

H_{tg} = Altura de la unidad de transferencia debido a la fase gas.

H_{ts} = Idem. a la fase sólida.

k_y = Coeficiente individual de transferencia de masa en la fase gas.

k_s = Idem. en la fase sólida.

m = Pendiente de la curva de equilibrio.

L_s = Velocidad másica superficial del flujo sólido libre de adsorbato.

En la segunda situación -fraccionamiento- los cálculos se complican bastante, tratándose, incluso, de sólo dos componentes a adsorber. Las expresiones para el cálculo de la altura de adsorbente son similares a las anteriores, sólo que en este caso se aplicarán a las dos zonas a considerar en el equipo: sección de adsorción propiamente dicha, y sección de enriquecimiento. Debido a su poca utilización en el campo de la contaminación no se verá con detalle.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 168		
	2	TEMA : CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCIÓN	01	10	80

Los equipos más frecuentemente utilizados para el control de contaminantes de determinada naturaleza emitidos a la atmósfera, se basan en un lecho estacionario sobre el que se hace pasar la corriente gaseosa contaminada. La concentración de salida del lecho varía con el tiempo, lo que es característico de un régimen transitorio. La evolución de la concentración presenta la forma de una onda característica que se explicará en el siguiente apartado y que se denomina onda de adsorción.

11.6. EQUIPOS Y SISTEMAS

11.6.1. Principios de diseño de los equipos

Los requerimientos básicos para el diseño de equipos previstos para adsorción, son los siguientes :

- 1) Tiempo de contacto suficiente entre la corriente gaseosa y el lecho adsorbente con objeto de lograr una adecuada eficacia de adsorción.
- 2) Capacidad de adsorción adecuada a la vida de servicio prevista.
- 3) Mínima resistencia al flujo de aire con objeto de que los sistemas de impulsión trabajen convenientemente.
- 4) Uniformidad en la distribución del flujo del aire sobre el adsorbente con objeto de asegurar la plena utilización de éste.
- 5) Tratamiento previo del aire para eliminar las partículas no adsorbibles que disminuyen la acción del lecho adsorbente.
- 6) Sistema de renovación del adsorbente, una vez que ha alcanzado la saturación.

La acción del lecho adsorbente sobre una corriente de aire en movimiento se ilustra en la llamada onda de adsorción de las Figuras 2.11.5. y 2.11.6. Se estudiará primeramente el fenómeno en la Figura 2.11.5. El aire contaminado se mueve a través del lecho de izquierda a derecha. En el eje vertical figuran las concentraciones de contaminante en contacto con el lecho para cada espesor del mismo. Para una concentración inicial C_1 , la reducción hasta una concentración deseada C_t se realiza inicialmente para un espesor de lecho, denominado crítico, l_c . Si la longitud total del lecho l es superior a l_c , la concentración de salida C_e será inferior a C_t . La curva se desplaza con el tiempo continuamente hacia la derecha y se considera que el lecho alcanza el punto de ruptura cuando $C_e = C_t$. La saturación será completa cuando $C_e = C_1$.

Desde otra perspectiva, el fenómeno puede analizarse según la Figura 2.11.6. Al principio, se formará una zona de adsorción en cabeza, debido a que las capas superiores del lecho son las que van a adsorber prácticamente todo el soluto. Al aumentar el volumen de gas contaminado tratado, la zona de adsorción se desplaza a capas más inferiores al saturarse las inmediatas superiores. La corriente gaseosa de salida, inicialmente libre de adsorbato, incrementa progresivamente su concentración hasta llegar a la concentración límite establecida que, al igual que antes, constituye el punto de ruptura.

En líneas generales, la velocidad de paso de la corriente gaseosa está comprendida entre 0,05 y 0,20 mts/seg. Por otra parte, el espesor del lecho, para evitar pérdidas de carga elevadas, está comprendido entre

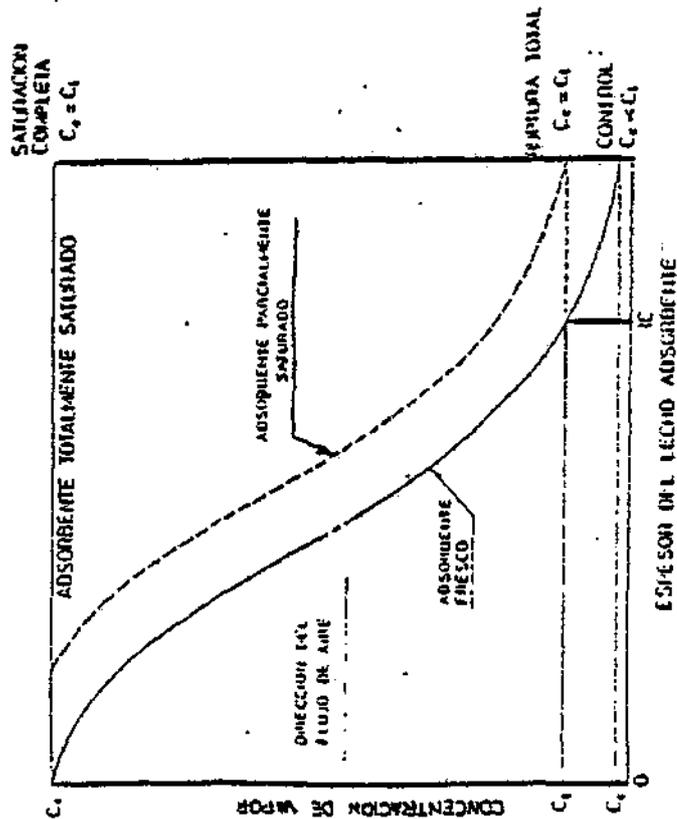
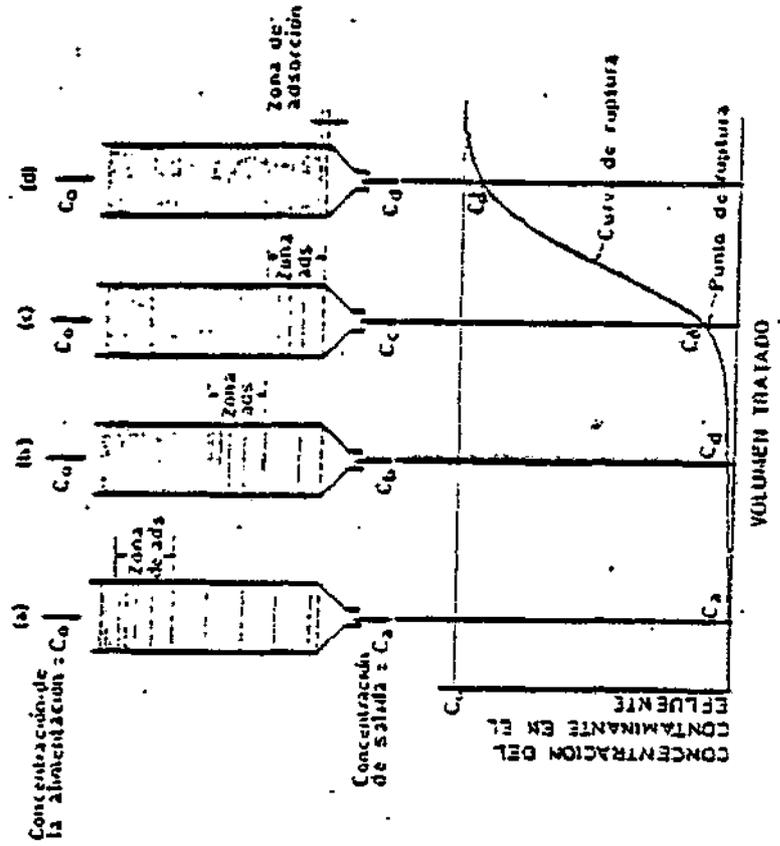


Figura. - 2.11.6. - Onda de adsorción.

Figura. - 2.11.5. - La onda de adsorción. Evaluación en el tiempo de la acción de un ciclo adsorbente sobre una corriente gaseosa.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2:2./179		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

0,3 y 1 metro. Se ha dicho anteriormente la conveniencia de incluir un filtrado y un enfriamiento como tratamiento previo a la adsorción.

Las características de diseño impuestas por los requerimientos básicos apuntados y por la naturaleza de la onda de actuación dinámica, se analizarán a continuación para algunos sistemas y tipos de equipo.

- Adsorbentes depositados sobre un portador

El adsorbente, normalmente en forma de polvo fino, se dispone sobre un portador inerte que puede ser de papel, fibra textil orgánica o inorgánica, o sustancia plástica en forma de filamentos. A este respecto, se han desarrollado papeles que contienen del 50% al 70% de carbón en peso, así como filamentos de celulosa con polvo de carbón activo que pueden alcanzar un nivel del 80% en peso de carbón activado.

Debido a las limitaciones que presentan estos adsorbentes, en cuanto a capacidad y rigidez, su aplicación no es muy elevada.

- Adsorbedores de lecho granular delgado

Su ventaja esencial la constituye la baja resistencia que presentan al flujo de aire. Sin embargo, tanto el espesor del lecho, como su uniformidad, son muy importantes, ya que pueden ocasionar errores por canalización.

El material granular, se retiene merced a las barreras porosas, pantallas, o carcassas de metal perforado. En la Figura 2.11.7., aparece un equipo de este tipo.

Los caudales procesados por estos equipos, oscilan desde 25 pies cúbicos/min. para sistemas cilíndricos tipo canister, hasta 1.000 ó 2.000 pies cúbicos/min. procesados por los diferentes tipos de sistemas tipo carcasa.

- Adsorbedores de lecho granular espeso.

Se utilizan cuando se necesita una gran capacidad de adsorción. El aumento de eficacia logrado con este sistema, no constituye una justificación suficiente para usarlo, ya que también se requiere una buena uniformidad del lecho. Los espesores utilizados están comprendidos en el rango de 0,3 m + 1 m. (Figura 2.11.8).

- Adsorbedores de lecho fluido

Al pasar una corriente gaseosa en sentido ascendente a través de un lecho adsorbente granular, la caída de presión impuesta por el lecho se opone a su propio peso. Si la velocidad se aumenta hasta un valor determinado, la caída de presión iguala al peso del lecho y el sólido (adsorbente) comienza a moverse. Este movimiento se denomina fluidización.

Para velocidades más altas de la corriente gaseosa, las partículas granuladas adsorbentes, pueden mantenerse en movimiento continuo (Figura 2.11.9).

La caída de presión requerida para esta fluidización, depende del espesor del lecho y de las densidades de la corriente gaseosa y de las partículas sólidas.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA.2.2./171	
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA	
E.O.I. MINER	10	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR VIA HUMEDA	01	10

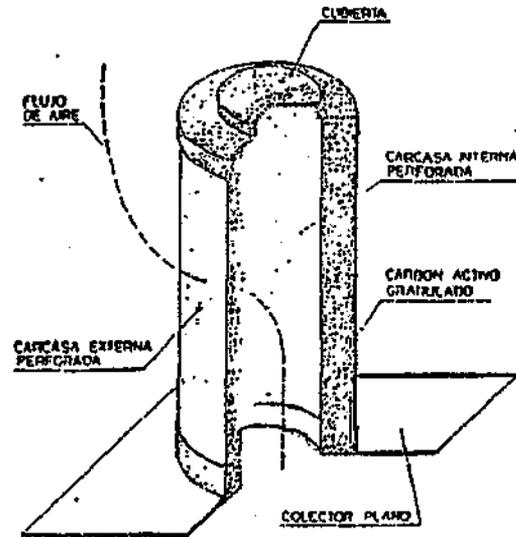


Figura.- 2.11.7.- Adsorbedor cilindrico tipo canister de lecho delgado

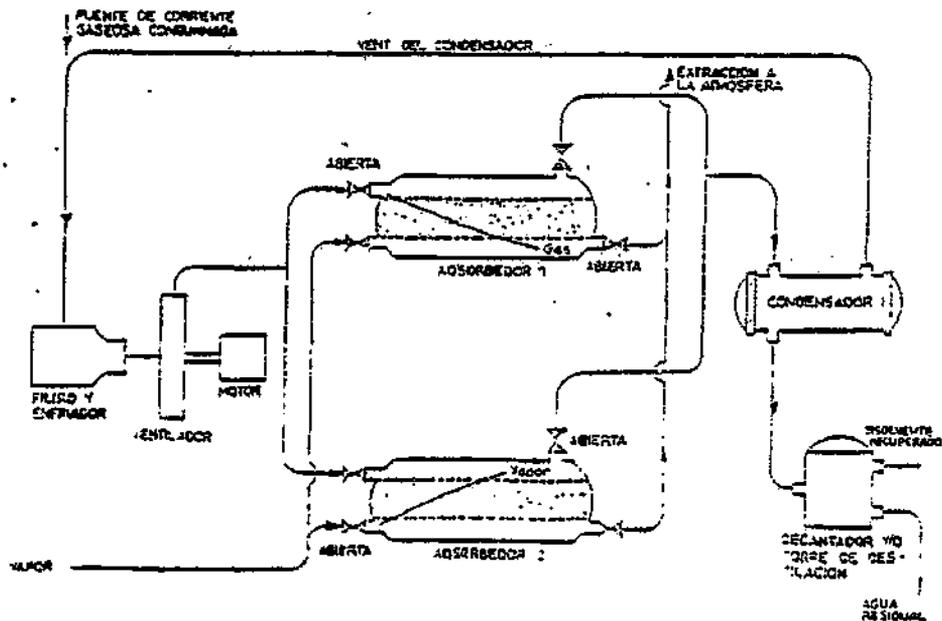


Figura.- 2.11.8.- Sistema regenerativo de dos etapas: El adsorbedor 1 está adsorbiendo. El adsorbedor 2 está regenerándose.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./172		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

11.6.2. Sistemas de procesamiento

- Generalidades

El aire contaminado puede hacerse pasar a través del lecho adsorbente parcialmente, completamente, o con recirculación. Por lo general, se utiliza un solo paso, total o parcial, eliminándose la corriente gaseosa - descontaminada a la atmósfera.

Antes de la etapa de adsorción, como ya se ha indicado, conviene tratar la corriente gaseosa por una o varias de estas vías :

- a) Eliminación, por filtración, de las partículas cuyo tamaño pueda obstruir al adsorbente.
- b) Aumento de la capacidad de adsorción mediante una concentración previa de los contaminantes, lo que - incluye operar con un aumento de presión.
- c) Eliminación mediante métodos eléctricos o mecánicos de las gotículas de agua que pueden también obstruir al adsorbente. Ello supone la dilución de la corriente gaseosa con aire ambiente de menor humedad relativa, o la condensación del exceso de humedad del aire y el posterior calentamiento de éste hasta una humedad relativa óptima.
- d) Enfriamiento de la corriente gaseosa, si su temperatura es muy elevada ($> 100^{\circ}\text{F}$), ya que las temperaturas elevadas reducen la capacidad del carbón acelerando su oxidación, disminuyendo su tiempo de vida y dificultando en cualquier caso su recuperación.

Hay que tener en cuenta que un enfriamiento mediante dilución con aire ambiente, implica un aumento en el tamaño de los adsorbedores y el subsiguiente coste de potencia que supone el movimiento de un mayor volumen de aire.

- e) Disminución de la concentración. En determinados casos hay que considerar la posibilidad de que las - concentraciones que se manejan puedan llevar a la mezcla gaseosa al rango de explosividad o que, por el - contrario, el calor de adsorción adquiera un valor tal, que produzca una temperatura elevada en el lecho del carbón. En estos casos hay que utilizar un sistema de dilución que disminuya la concentración.

El tiempo de vida útil del adsorbente viene delimitado por su capacidad y por la carga de contaminante, como consecuencia de lo cual, debe estar prevista su renovación periódica.

No existe un instrumento adecuado para medir el grado de saturación de un adsorbente en un adsorbedor utilizado para descontaminar una corriente de gas húmeda. La ganancia de peso no es un criterio válido, pues to que el contenido en humedad del adsorbedor es variable. La necesidad de renovación del adsorbente, puede determinarse sobre la base de sus condiciones de funcionamiento (alcance del punto de ruptura) o de - acuerdo con un tiempo fijado por la experiencia y/o cálculos realizados acerca de la saturación de dicho ad sorbente. Cuando sea posible, constituye un buen sistema de control el análisis químico efectuado sobre una porción de adsorbente retirado de la masa del mismo.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.3.173		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.L. MINER	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

- Sistemas no regenerativos

En estos sistemas, se descarga el adsorbente en otro lugar, una vez que ha descendido su funcionamiento - (Figura 2.11.10).

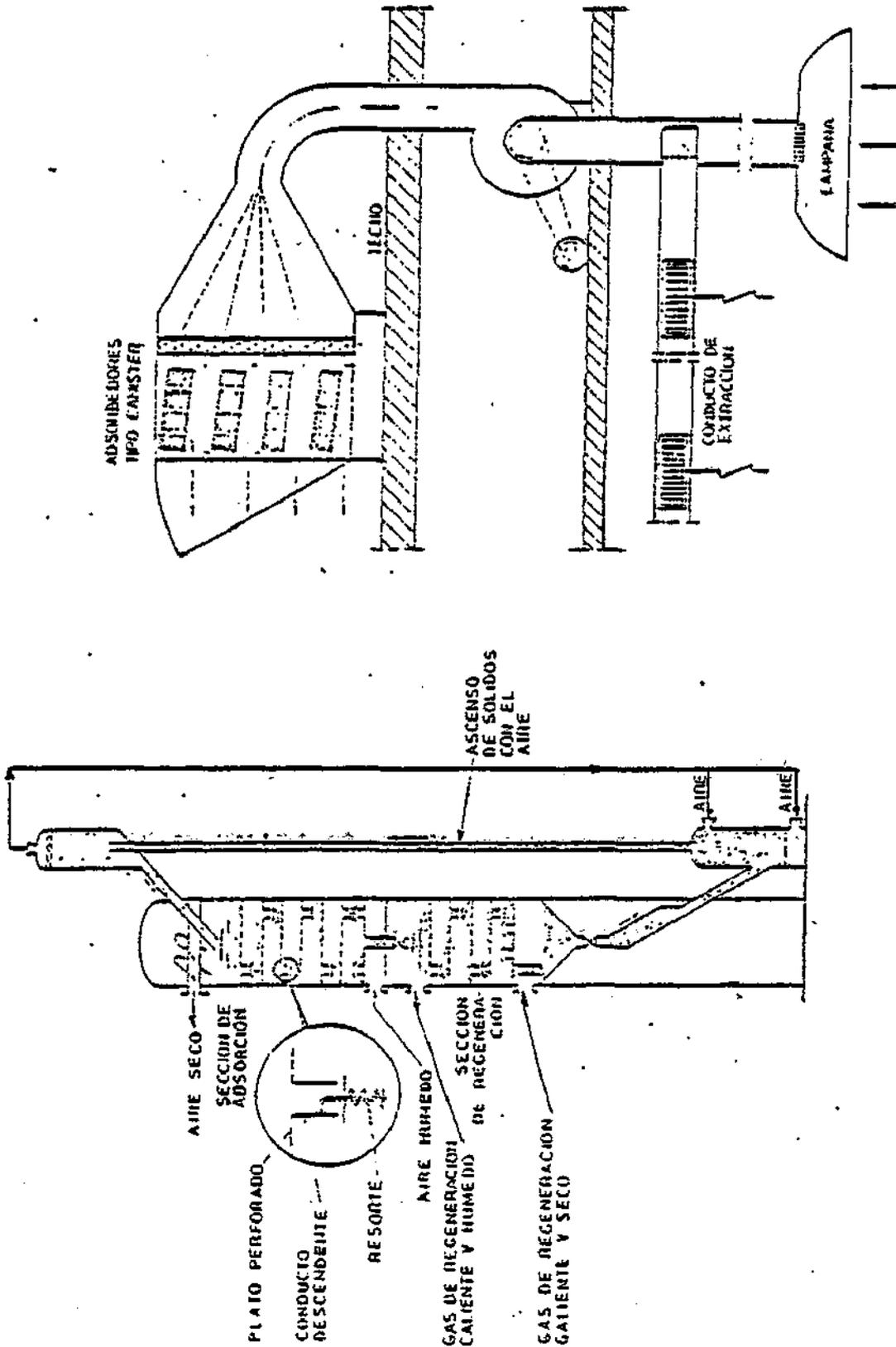


Figura - 2.11.10. - Sistema de purificación de lecho delgado.

Figura - 2.11.9. - Lecho fuido en contra corriente de varias etapas, con regeneración.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 174		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCIÓN	01	10	80

El equipo puede ser de lecho delgado o de lecho espeso. En la Figura 2.11.11., se observa una modificación de este sistema prevista para asegurar una utilización más completa del adsorbente, alternándose la utilización de uno y otro lecho, lo que posibilita al adsorbente para ser utilizado en un intervalo de capacidad comprendido entre el punto de ruptura y la saturación completa.

Estos sistemas son aplicables económicamente para el control de focos contaminantes constituidos por vapores olorosos, pero presentes a concentraciones bajas (alrededor de 2 ppm) o cuando su utilización es intermitente (sistemas de extracción para Laboratorio).

- Sistemas regenerativos

a) Recuperación de adsorbato.

Los sistemas regenerativos suponen un buen sistema para la recuperación periódica "in situ" del adsorbente y del adsorbato. Se utilizan ventajosamente para la eliminación de vapores de focos de contaminación de concentraciones superiores a 1.000 ppm (0,1%).

El primer factor a considerar es la facilidad de recuperación del compuesto orgánico.

El aire contaminado, libre de materia particulada y a temperatura no superior a 100°F, se conduce a través de uno o más lechos espesos de carbón activado eliminándose el efluente a la atmósfera. Cuando el adsorbente alcanza un determinado nivel de saturación, se dirige la corriente gaseosa a otro adsorbedor "fresco" de tal forma, que el funcionamiento global es continuo.

El lecho saturado se regenera haciendo fluir vapor a través del mismo, pero en sentido contrario y condensando la mezcla de vapores efluentes y desorbidos. La recuperación del adsorbato puede realizarse por decantación o destilación.

En la Figura 2.11.12., se muestra un esquema en el que se describe un sistema regenerativo proyectado para la utilización plena de la capacidad del adsorbente. En este proceso, hay que evitar que la corriente de aire contaminado se ponga en contacto con un lecho caliente, ya que este contacto puede producir una descomposición u oxidación parcial, originándose una descarga a la atmósfera de gases olorosos o irritantes.

En muchas ocasiones, no hay que separar los ciclos de enfriamiento y secado, debido a que el aire contaminado enfría y seca al lecho de carbón lo suficientemente rápido. La onda de enfriamiento viaja, entonces, a través del lecho considerablemente más rápida que la de adsorción. En el caso de que, para elevadas concentraciones de vapor, las velocidades de desplazamiento de ambas ondas, sean similares, se necesitaría un enfriamiento previo.

b) Destrucción del adsorbato.

Por lo general, no es deseable operar en sistemas no regenerativos, en un rango de concentraciones comprendido entre 2 ppm y 1.000 ppm, debido al elevado coste de la sustitución del adsorbente y de los sistemas de recuperación del adsorbato como consecuencia, a su vez, del poco valor del compuesto orgánico recuperado. El sistema más apropiado de eliminación en el intervalo de concentraciones indicado, consiste en una destrucción por oxidación del adsorbato. En un sistema de este tipo, el adsorbente es carbón activado

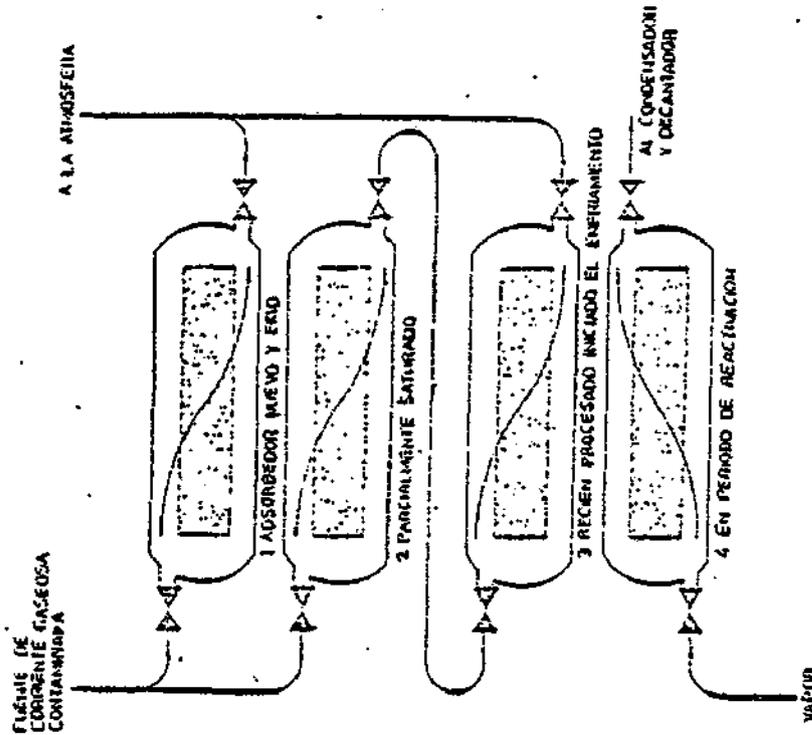


Figura. - 2.11.12. - Sistema regenerativo de cuatro etapas.

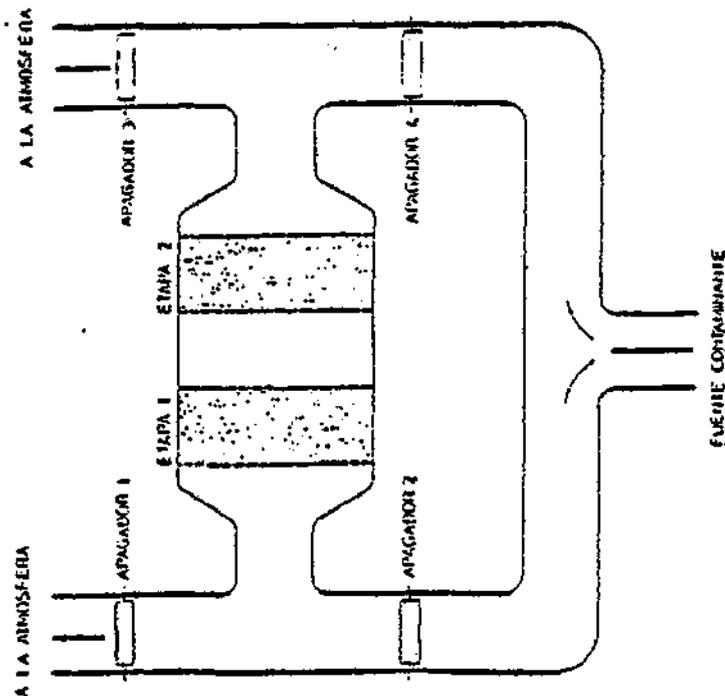


Figura. - 2.11.11. - Sistema no regenerativo de dos etapas.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 176		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E. O. I. M. I. N. E. R	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

impregnado con una pequeña cantidad de catalizador de pequeña actividad. El carbón actúa como adsorbente a temperatura ambiente, sin acción catalítica, hasta que se satura con respecto al contaminante que pasa a su través. Es entonces cuando, en vez de desorber con vapor, se efectúa una activación mediante el calentamiento de la corriente entrante hasta una temperatura a la que se inicia la oxidación catalítica, durante un tiempo suficiente que permita la total destrucción por oxidación del adsorbato sobre la superficie catalítica.

Un carbón activado que posea una elevada temperatura de ignición, permitirá la oxidación de todo el adsorbato pero no la propia. Son válidas para este propósito, los carbones activados cuya temperatura de ignición sea, como mínimo, de 350°C ó 400°C. Pueden realizarse sucesivas reactivaciones de este tipo sin disminuir la capacidad de adsorción de la superficie del carbón. Los vapores desorbidos durante el calentamiento inicial, antes de que predomine la oxidación catalítica, se recirculan para minimizar su descarga a la atmósfera.

11.7. APLICACIONES AL CONTROL EN EL FOCO

11.7.1. Efectos de las variables de proceso.

- Flujo de aire

El flujo de aire está ligado inversamente con el tiempo de retención o duración del contacto, entre la corriente gaseosa y el lecho adsorbente. Cuando al flujo de aire es elevado, puede producirse una distribución desigual, o pasos preferenciales a través del lecho, lo que conlleva, además, un aumento del desgaste mecánico. El factor dominante para el flujo de aire, lo constituye la caída de presión. En la Figura 2. - 11.13., se representa la caída de presión en función del caudal para distintos tipos de carbón activado.

La eficacia del lecho, por otra parte, está muy condicionada por su tamaño de partícula.

Para espesores de, incluso, 0,5 pulgadas, puede obtenerse una eficacia superior al 95% cuando la distribución del lecho es homogénea y el tamaño está comprendido dentro del rango de 6 a 16 mallas. En estas circunstancias, la velocidad lineal es del orden de 0,25 m/seg. y el tiempo de retención de 0,03 seg.

En los lechos espesos utilizados en sistemas con recirculación, la velocidad lineal es del orden de 1 m/seg. no habiéndose encontrado efectos adversos en cuanto la eficacia del lecho. El factor limitador en este caso es el coste de la potencia necesaria para conducir el aire a través del lecho en cuestión.

- Temperatura

La capacidad de un adsorbente aumenta al disminuir la temperatura. Ya se ha dicho que deben evitarse temperaturas superiores a 100°F (38°C). En algunos procesos cíclicos, pueden producirse fluctuaciones de temperatura que pueden provocar una desorción durante los periodos de alta temperatura.

- Humedad

El carbón activado adsorberá la humedad de una corriente gaseosa, pero la eliminará a la atmósfera durante el proceso de adsorción, debido a que, normalmente, la polaridad de las moléculas adsorbidas es inferior a la del agua. La presencia de alguna humedad puede ser incluso deseable, debido a que su vaporización disipa el calor de adsorción y proporciona una temperatura del lecho más uniforme.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,21 / 177		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.L. MINER	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

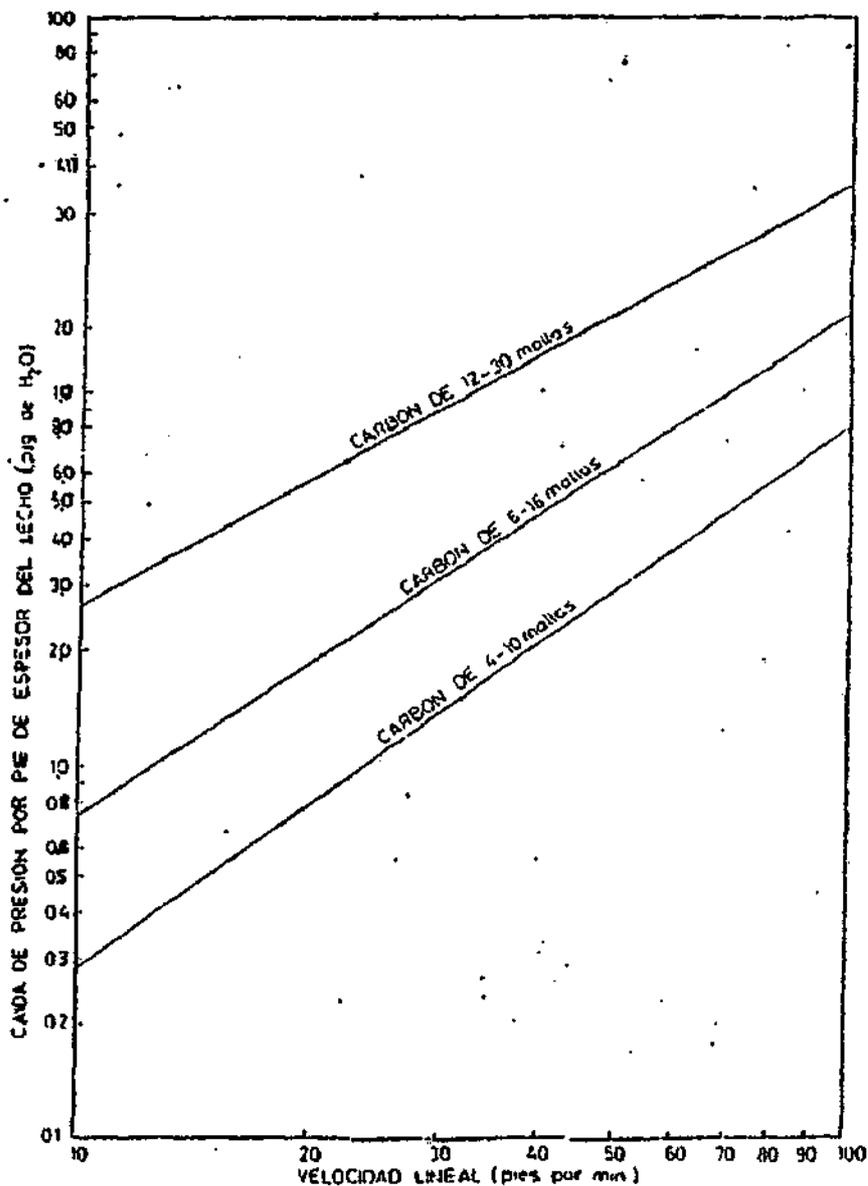


Figura. - 2.11.13. - Caída de presión para distintos caudales a través de lechos de carbón granular.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 178		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

Cuando la humedad relativa de la corriente gaseosa es superior al 50%, la disminución de la capacidad de adsorción del carbón es significativa. Para contenidos en humedad más elevados, la disminución de esta capacidad y de la eficacia es más acusada. Este efecto suele ser independiente de la temperatura en las condiciones de operación usuales.

- Concentración de vapor

El tiempo de servicio del adsorbente viene determinado por la concentración de vapor dominante, de acuerdo con la expresión :

$$t = \frac{6.43 \times 10^6 S W}{e Q_r M C_v}$$

donde :

- t = tiempo de servicio del adsorbente antes de su saturación (horas).
- S = saturación proporcional del adsorbente (valores de retención en la Tabla 2.11.2.)
- W = peso del adsorbente (lbs)
- e = eficacia de adsorción (fraccional)
- Q_r = caudal de aire a través del lecho adsorbente (pies cúbicos/min.)
- M = peso molecular medio del vapor adsorbido.
- C_v = concentración del vapor entrante (ppm)

Unas condiciones usuales, definidas por un valor de S = 0,20, una adsorción completa (e = 1) y un vapor de M = 100, hacen que la expresión anterior adopte la forma :

$$t = \frac{1.29 \times 10^4 W}{Q_r C_v}$$

Los vapores polimerizables o las mezclas de vapor, como por ejemplo el vapor de fenol-formaldehído, - tienden a depositar resinas no desorbibles en los poros del carbón, inutilizándolo para sistemas cíclicos que empleen vapor. Sin embargo, debido a que estas resinas son combustibles, puede pensarse en una regeneración oxidativa. En los casos en que los gases polimerizables constituyan una fracción pequeña del total, vale la pena eliminarlos previamente. Así, se suele utilizar un lavado caústico de gases para eliminar fenoles, y, posteriormente, recuperar los disolventes.

11.8. PROCESOS ESPECIFICOS

11.8.1. Desodorización

Existen compuestos clorosos que incluso en concentraciones del orden de 100 ppb, pueden detectarse olfativamente y ser molestos. En muchas ocasiones, el control de estas emisiones por adsorción, constituye un sistema de control efectivo y económico. Cuando la concentración de los gases descargados es elevada, la etapa de desodorización, puede ser la última etapa de limpieza.

En la Tabla 2.11.3., figuran una serie de procesos que producen efluentes clorosos eliminables por adsorción.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./179.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. (MINER)	11	CAPITULO: DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

TABLA 2.11.1.

ESPECIFICACIONES TIPICAS PARA CARBON ACTIVADO UTILIZADO EN LA PURIFICACION DEL AIRE.-

<u>Cualidad</u>	<u>Especificación</u>
Actividad para Cl_4C^a	50% mínimo
Retención para Cl_4C^b	30% mínimo
Densidad aparente	0,4 g/ml. mínimo
Dureza ^c	80% mínimo
Distribución	Rango 6-14 (Series de tamices Tyler).

NOTAS:

- Máxima saturación del carbón, a 20°C y 760 Torr en una corriente de aire en equilibrio con Cl_4C a 0°C.
- Peso máximo de Cl_4C retenido por el carbón tras una exposición a aire puro a 20°C y 760 Torr.
- Porcentaje de carbón de 6-8 mallas que permanece sobre un tamiz de 14 mallas después del agitado durante 30 minutos con 30 bolas de acero de diámetro comprendido entre 0,26 y 0,37 pulgadas de diámetro, de 50 grs. de carbón en un vibrador.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2, / 180		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

TABLA 2.11.2.

RETENCION DE VAPORES POR CARBON ACTIVADO

Sustancia	Fórmula	Peso molecular	Punto de ebullición °C	Retención aprox. en S. a 20° C y 760 mm
acetaldehído	C_2H_4O	44,1	21	7
acetato de amilo	$C_7H_{14}O_2$	130,2	148	34
ácido butírico	$C_4H_8O_2$	88,1	154	35
tetracloruro de carbono.	CCl_4	153,8	76	76
acetato de etilo	$C_4H_8O_2$	88,1	77	19
etil mercaptano	C_2H_5S	62,1	35	23
eucaliptol	$C_{10}H_{18}O$	154,2	176	20
formaldehído	CH_2O	30	-21	3
cloruro de metilo	CH_3Cl	50,5	-24	5
ozono	O_3	48	-112	se descompone a oxígeno.
putrescina	$C_4H_{12}N_2$	88,2	156	25
skatol	C_9H_9N	131,2	266	25
anhídrido sulfuroso.	SO_2	64,1	-10	10
tolueno	C_7H_8	92,1	111	29

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 181		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

TABLA 2.11.3.

PROCESO QUE COMPORTA LA DESCARGA ATMOSFERICA DE LOS OLORES POSIBLES

Industria	Proceso
Industria alimentaria	Deshidratación, envasado en latas, trabajos de cocina, freído, cocción, torrefacción del café; trabajos en el proceso de los pescados, pollos y carnes; manipulación y mezcla de las especias; derretido de grasas y sobras y otros tratamientos de desperdicios; procesos de fermentación.
Fabricación y utilización de productos químicos.	Procesos que comportan la descarga a la atmósfera de desperdicios o productos recuperables, disolventes o clasificantes; pérdida de pequeñas cantidades de materia los altamente olorosos, como en la fabricación de pesticidas, gomas, cementos, adhesivos, fertilizantes y productos farmacéuticos (especialmente los extraídos de fuentes naturales, tales como glándulas - orina y sangre); producción de pinturas y barnices; desprendimiento de vapores olorosos en tanques de almacenamiento durante las operaciones de llenado y trasvase.
Procesos diversos	Lugares de odorización de gas, incluyendo contenedores, capósitos de almacenaje y puntos de inyección de odorante; fabricación de papel y pulpa; operaciones de curtido; fundiciones; fabricación de productos asfálticos tales como los que se usan para techumbres; descarga de productos olorosos extraídos de laboratorios de animales; y muchos otros.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2. / 182		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER.	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

11.8.2. Control de emisiones gaseosas radiactivas.

La adsorción de sustancias radiactivas, sigue los mismos principios que los enunciados para gases y vapores no radiactivos. Las aplicaciones de esta técnica utilizan al carbón activado como sistema para prevenir la emisión de gases radiactivos producidos en reactores nucleares u otras fuentes.

11.8.3. Eliminación del SO₂ de los gases de combustión

- Proceso Reiniuft

Este proceso se basa en la adsorción y oxidación catalítica como etapas de eliminación, utilizando un lecho móvil de carbón activado en un sistema regenerativo. Las etapas que tienen lugar son las siguientes (Figura 2.11.14) :

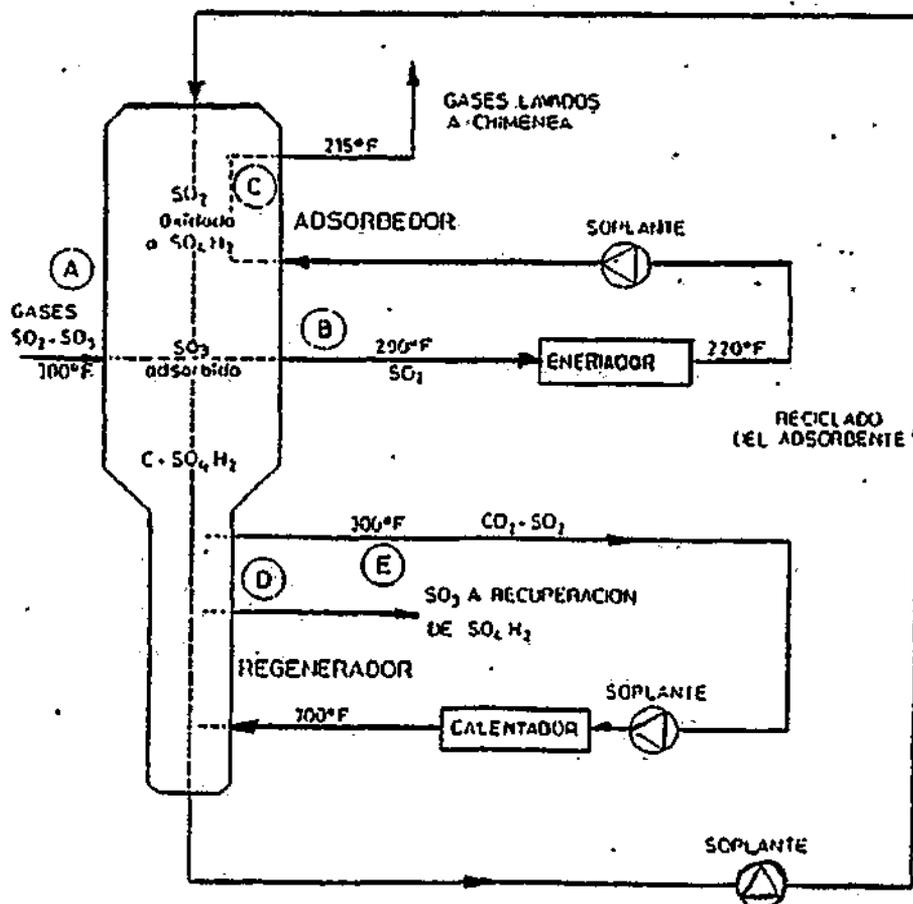


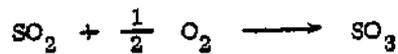
Figura. - 2.11.14. - Proceso Reiniuft. Esquema simplificado.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA.2.2./183		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L M I N E R	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80

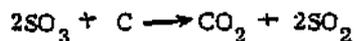
A - El gas de combustión que contiene SO₂ y SO₃, entra en el adsorbedor a 300°F. El SO₃ queda adsorbido sobre el carbón y el SO₂ pasa a través de él.

E - A continuación, se extrae del sistema, se enfría y se introduce en el lecho adsorbente a un nivel superior. Por este enfriamiento, la temperatura del SO₂ pasa de 300 a 220°F.

C - El SO₂ se oxida a SO₃, produciéndose ácido sulfúrico que permanece sobre el carbón.



D - El movimiento descendente del lecho conduce el carbón con el ácido sulfúrico a la sección de regeneración (700°F), donde se disocia. Se recupera parte de SO₃ y otra parte reacciona con el carbón.



E - El gas producto, que abandona el regenerador a 300°F, se recalienta a 700°F y se vuelve a introducir en la base del regenerador.

- Proceso de la alúmina alcalina

Los gases de combustión, que al igual que antes contienen SO₂ y SO₃, se hacen pasar a través de un lecho que puede ser fluidificado, de alúmina alcalina a 625°F integrada por Al₂O₃ y Na₂O principalmente (56% y 37% respectivamente). Como resultado, el SO₂ se oxida a SO₃, pasando éste SO₃ a sulfato.

El adsorbente gastado se transfiere a un regenerador donde se trata con hidrógeno o gas natural reformado (CO, CO₂ y H₂) a 1.200°F. De este modo, se reducen los sulfatos adsorbidos para dar SH₂, SO₂ y H₂O. El SH₂, por último, se recupera como azufre elemental.

- Proceso de oxidación catalítica

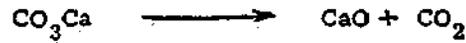
Los gases de combustión a 900°F, libres de materia particulada mediante su paso por colectores mecánicos y precipitadores electrostáticos, se vehiculan a través de un lecho fijo de V₂O₅ que convierte el SO₂ a SO₃.

El sistema es similar, esencialmente, al de una planta de ácido sulfúrico por el método de contacto. Seguidamente, se enfría el gas de salida a 200°F produciéndose una niebla que se elimina mediante un precipitador electrostático o un filtro adecuado. La solución resultante de ácido es del 70%.

- Proceso de la Dolomita

El polvo de dolomita (carbonato cálcico magnésico) o de magnesita (carbonato magnésico) promueve la oxidación del SO₂ a SO₃. Posteriormente, el SO₃ reacciona con los carbonatos para producir sulfatos.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 3.4./184		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	11	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR ADSORCION	01	10	80



Este método tiene la ventaja del bajo coste de la inversión, pero presenta problemas de eliminación de las escorias de sulfatos.

11.9. INSTRUMENTOS PARA EL CONTROL DE PROCESOS

El control de una planta de adsorción por carbón activado, y, en general, de cualquier otro tipo de adsorbente, puede llevarse a cabo simplemente con la ayuda de medidores de caudal y de temperatura.

Los factores más importantes a considerar en el caso de disolventes orgánicos, son los siguientes :

a) La concentración del disolvente.

Puede calcularse conociendo la cantidad de disolvente que se evapora por unidad de tiempo y la cantidad de aire o gas que pasa a través de la planta de adsorción. En la mayor parte de los casos, se conoce la velocidad de evaporación por lo que es suficiente conocer el caudal de aire lo que puede llevarse a cabo, por ejemplo, con un medidor de orificio.

Cuando las concentraciones implicadas sean inferiores a 1% en volumen, pueden seguirse otras vías para el cálculo de estas concentraciones como pueden ser :

- Adsorción del disolvente en un adsorbedor pequeño que contenga carbón activado.
- Análisis cualitativo y cuantitativo.
- Técnicas de Espectrometría I.R., Cromatografía de gases, etc.

b) La temperatura de adsorción.

Deben colocarse termómetros estratégicamente situados en el conducto de aire contaminado y en el lecho de carbón, ya que cualquier cambio en las condiciones de operación, se traduce en un cambio de temperatura.

Si se utilizan termómetros-registradores, a distintos niveles del lecho, puede obtenerse una adecuada información acerca de cómo se está llevando a cabo el proceso de adsorción.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 185		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

El perfecto funcionamiento de los electrofiltros depende de una serie de parámetros entre los que destacan como más conflictivos los siguientes :

- Perfecta distribución de los gases entre las distintas unidades.
- Distribución de los gases en cada unidad.
- Dimensionamiento adecuado de cada unidad.

Así como una serie de factores que se comentarán más adelante, pero que en la mayoría de los casos, tratándose de fabricantes con experiencia, no tienen por qué presentar problemas, aún cuando con demasiada frecuencia se observan errores de diseño importantes.

Al objeto de facilitar el comentario sobre los electrofiltros, se efectúa primeramente una breve exposición del principio de funcionamiento y diseño de los electrofiltros.

En esencia, un electrofiltro consiste en un gran cajón de chapa, dividido longitudinalmente en varios pasillos de, aproximadamente, 300 mm. de anchura, mediante chapas metálicas perpendiculares, por los cuales pasa el aire cargado de polvo.

En el centro de los pasillos, se encuentran unos hilos electrodos emisores, conectados al polo negativo de un grupo transformador-rectificador de alto voltaje, mientras que las placas que forman los pasillos y que actúan como electrodos colectores, están conectadas al polo positivo y tierra, tal como se observa en la Figura 2.12.1.

La precipitación del polvo en un electrofiltro, se realiza en dos fases simultáneas; carga eléctrica de las partículas y atracción electrostática.

La polaridad negativa de los electrodos de emisión, ha sido escogida por permitir una corriente de efluio y una mejor estabilidad de la descarga que la polaridad positiva. Además, la tensión necesaria para provocar el arco es más elevada.

La carga de las partículas se obtiene por contacto con la corriente de electrones que circulan a gran velocidad entre los electrodos de emisión y las placas o electrodos de depósito. Para obtener esta corriente de electrones es necesario aplicar una diferencia de potencial muy elevada entre electrodos y placas, creando así un campo eléctrico ionizado, lo que se traduce en una descarga por efluio llamada efecto corona y materializada por diversos efectos ópticos, acústicos y eléctricos. Por tanto, la carga efectiva de la partícula dependerá de la producción de un gran número de iones y de una efectiva transferencia de la carga de estos iones a las partículas a precipitar.

Analicemos, pues, las condiciones necesarias para la formación y mantenimiento de la corona. Cuando se aplica una diferencia de potencial entre dos placas paralelas, se produce un campo eléctrico uniforme en el entrehierro. Cuando esta diferencia de potencial alcanza un valor crítico (30 kv/cm en el caso del aire) se produce la ruptura de gas y salta un arco entre las placas. No puede, pues, producirse el efecto corona en un campo uniforme como el descrito, por lo que si pasase un gas cargado de polvo entre las dos placas, no se produciría precipitación de partículas, pues éstas no se cargarían.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2. / 186		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

Cuando, como en el caso de los electrofiltros, el sistema de electrodos es a base de hilos emisores y placas y se aplica un voltaje adecuado, se obtiene como resultado la ruptura del gas en las cercanías del electrodo emisor, como consecuencia de la alta intensidad de campo que hay en esta zona, mientras que a medida que nos separamos del electrodo emisor, el campo decrece hacia el electrodo colector. Hay pues que conseguir un campo no uniforme, que provoque una ruptura parcial del gas en las inmediaciones del electrodo emisor.

Si se aumenta el voltaje aplicado, se producirá la ruptura completa del entrehierro, con el consecuente salto de chispa o arco. Si esta situación se mantiene, los electrodos colectores y emisor, quedarán cortocircuitados afectando, por tanto, al fenómeno de la precipitación, debido a la desaparición de la corona. Por tanto, es necesario el mantenimiento de una corona estable para el funcionamiento del precipitador electrostático.

Para que el rendimiento del precipitador sea alto, es necesaria una alta intensidad de campo, de modo que el voltaje aplicado debe ser tan alto como lo permita el mantenimiento del efecto corona.

El voltaje mínimo con el que se puede obtener el efecto de descarga corona, depende en gran parte de la forma y separación entre electrodos. Puesto que este voltaje conviene que sea lo menor posible, se utilizan normalmente como electrodos emisores alambres no circulares, de sección tan pequeña, como lo permitan las necesarias características de resistencia mecánica.

La Figura 2.12.2., muestra, para unas condiciones determinadas, el valor del efecto corona por metro de electrodo emisor en función de la tensión aplicada al primario de transformador-rectificador para distintos tipos de electrodos. En definitiva, el efecto corona se considera producto de la alta intensidad de campo existente en la zona alrededor del emisor. En esta zona, los electrones libres adquieren altas velocidades e ionizan las moléculas de gas por colisión, produciéndose a la vez efectos de foto-emisión.

En la zona exterior, que ocupa la mayor parte del entrehierro, hay una intensidad de campo menor y una densa nube de iones gaseosos de la misma polaridad que el cable emisor de la corona y en rápido movimiento hacia el electrodo colector bajo la influencia del campo eléctrico.

Experimentalmente, se ha visto que el voltaje de inicio del arco, que es el límite superior del voltaje de funcionamiento, decrece con la longitud de electrodo emisor alimentado desde una única fuente de alimentación. Por tanto, para un fenómeno de precipitación efectivo, deberá limitarse la longitud del electrodo emisor por unidad de alimentación de energía. Esto explica el por qué se dividen los grandes electrofiltros en varias secciones, cada una alimentada por un grupo transformador independiente.

La carga límite q_s , que puede adquirir una partícula, viene dada por la expresión :

$$q_s = p E a^2, \text{ siendo : } p = \frac{3D}{D+2} \quad (1)$$

E = intensidad del campo

D = constante dieléctrica del polvo

a = diámetro de la partícula

Como consecuencia de la carga adquirida y del campo aplicado, la partícula tendrá una velocidad de migración hacia el electrodo colector que vendrá dada por :

$$w = \frac{2 E^2 a}{6 \pi \mu} \quad (2)$$

siendo μ , la viscosidad del gas.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2./,187		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

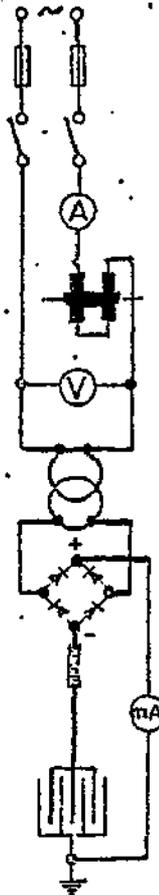


Figura. - 2.12.1.

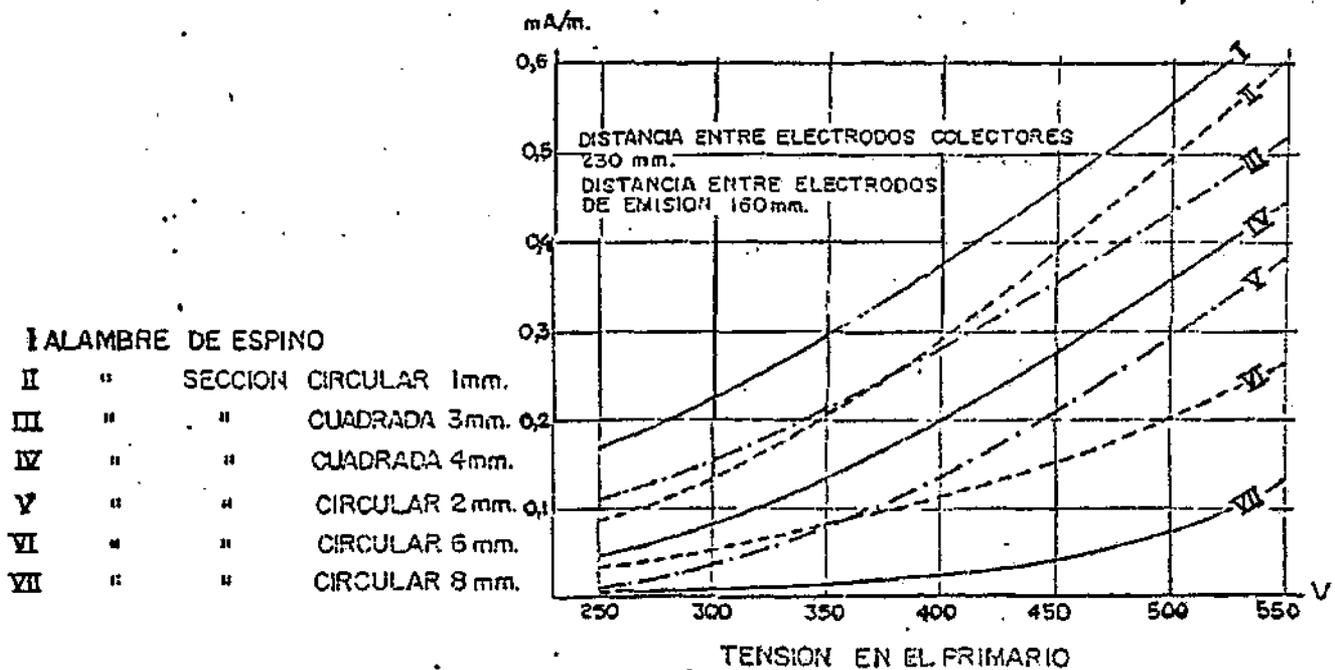


Figura. - 2.12.2.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 188		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

La precipitación de la partícula cargada sobre la placa colectora, puede entonces definirse por la resultante de dos velocidades, la velocidad del gas y la velocidad de migración. En teoría, bastaría disponer de un aparato suficientemente largo para que todas las partículas fuesen precipitadas alcanzando un rendimiento del 100%. En realidad, la corriente gaseosa presenta siempre turbulencias (debida a la distribución de los gases, desigualdades de la superficie de las placas, viento eléctrico y sistema de limpieza de electrodos por golpeo) resultando que la precipitación no es más que una probabilidad estadística. El rendimiento de un electrofiltro viene expresado por la ecuación:

$$\eta = 1 - e^{-w \frac{S}{Q}} \quad (3)$$

donde :

- η = rendimiento en tanto por uno
- e = base de los logaritmos neperianos
- w = velocidad de migración en m/s
- S = superficie total de los electrodos de depósito en m^2
- Q = caudal de gases tratado en m^3 efectivos/s.

Según esto, el primer esbozo de diseño de un electrofiltro sería del siguiente modo:

Dado un caudal Q y la concentración de entrada (C_E) al electrofiltro, se calcularía el rendimiento en función de la concentración deseada a la salida C_S .

$$\eta = \frac{C_E - C_S}{C_E}$$

Conocidos Q y h , se determinaría la velocidad de migración w , correspondiente a la aplicación concreta de que se trate con lo que ya se puede despejar el valor de S . El paso siguiente sería distribuir la superficie total S dando al electrofiltro sus tres dimensiones, número de pasillos, número de campos de precipitación, etc.

Como hemos visto, la clave del diseño de un electrofiltro reside en la perfecta evaluación de la velocidad de migración w . En la fórmula (2), se han indicado los factores de los que depende, si bien esta expresión se ha obtenido a base de establecer una serie de simplificaciones teóricas, tales como :

- partículas perfectamente esféricas
- distribución uniforme del gas
- campo iónico uniforme

lo que, desafortunadamente, no es cierto, existiendo pues una gran discrepancia entre los valores experimentales de w y los calculados teóricamente.

En realidad, la velocidad de migración w , consecuentemente, el rendimiento, está afectada por una serie de factores que vamos a comentar brevemente.

- Resistividad del polvo

La resistividad de una sustancia es la propiedad que caracteriza su resistencia eléctrica. Se puede calcular

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2, 2, / 189		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

aplicando un voltaje a una muestra y midiendo la corriente que pasa por la misma.

$$\rho = \frac{S \cdot V}{a \cdot l} \quad (4) \quad (\text{Figura 2.12.3})$$

siendo ρ la resistividad expresada en $\Omega \cdot \text{cm}$.

Un polvo como el carbón, con una resistividad baja, abandonará rápidamente su carga negativa sobre el electrodo colector, adquiriendo carga positiva y siendo repelido por el mismo, reintegrándose a la corriente gaseosa, donde volverá a cargarse negativamente.

La partícula será alternativamente atraída y repelida, saltando a través del precipitador, golpeando a otras partículas ya colectadas y alejándolas del electrodo colector.

Si se tratase de azufre pulverizado, debido a su alta resistividad, presentará problemas a la hora de abandonar su carga negativa, una vez que ha sido captado por el electrodo colector. El lecho de polvo depositado mantendrá gran parte de su carga negativa, actuando como un aislante. La pérdida de potencial a través de este lecho, puede ser considerable y ejercer una acción adversa sobre el efecto de descarga corona, fenómeno que se conoce con el nombre de "corona de retorno".

Cuando la resistividad es de un valor medio, como en el caso del polvo de cemento, la partícula una vez captada abandonará parte de su carga en el electrodo colector, manteniendo una carga negativa suficiente como para mantener las partículas sobre el mismo.

En este último caso, la velocidad de migración se aproximaría a la calculada teóricamente, pero en los dos casos anteriores (carbón y azufre) la discrepancia es notoria.

Por otra parte, la resistividad varía con la temperatura y la humedad de los gases, siendo las curvas resultantes para cada tipo de polvo similares a las de la Figura 2.12.4.

La presencia de acondicionadores como el SO_4H_2 , NH_3 , K_2O , etc., hace también que la resistividad varíe con la temperatura. Así, para el caso concreto de las centrales térmicas de lignito, la Figura 2.12.5., muestra el efecto de la concentración de SO_4H_2 .

Así pues, a la hora de determinar la velocidad de migración en un caso concreto, es preciso tener en cuenta el efecto de factores como la temperatura, humedad y contenido en azufre.

En el caso de resistividad muy alta, se puede proceder a enfriar los gases por inyección de agua, pero teniendo cuidado de vigilar la evolución del punto de rocío, que en el caso de existir SO_4H_2 , puede presentar problemas de corrosión.

La dependencia de la resistividad con la temperatura, hace que la velocidad de migración y, por tanto, el rendimiento, presente en general una dependencia con la temperatura de la forma que indica la Figura 2.12.6., en la que se observa un bache de rendimiento comprendido entre los 200°C y 350°C. Esto es general para, prácticamente, todas las aplicaciones industriales del electrofiltro.

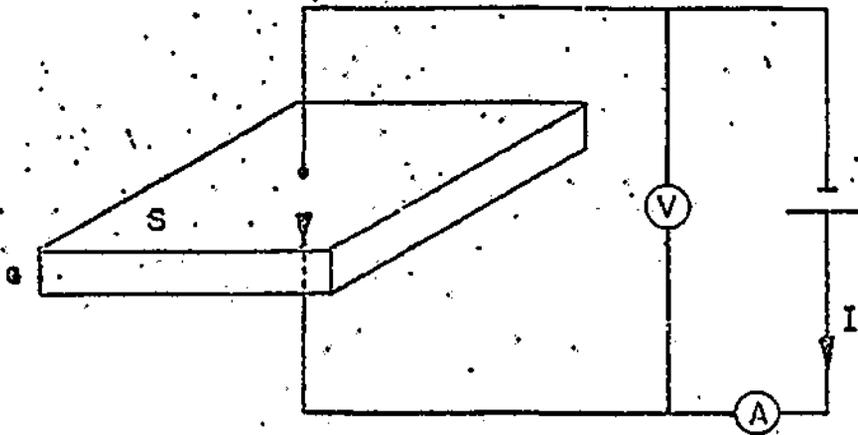


Figura. - 2.12.3.

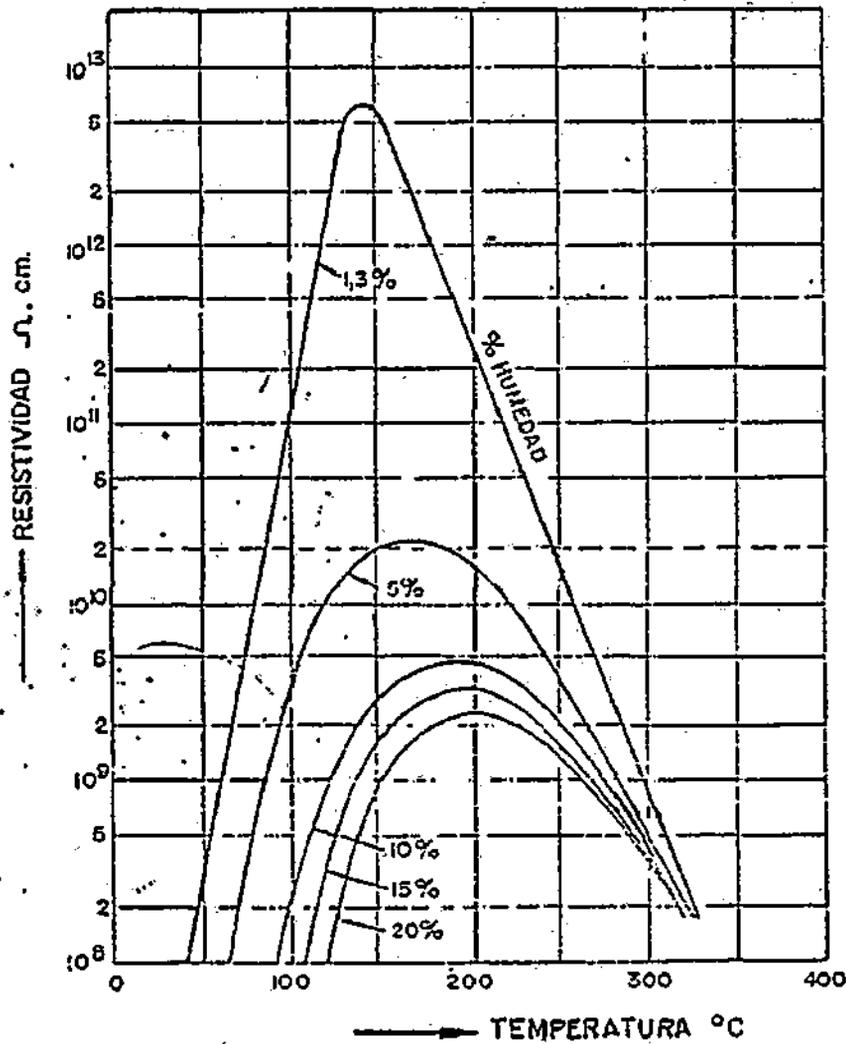


Figura. - 2.12.4.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2- / 191		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.L. MINER	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

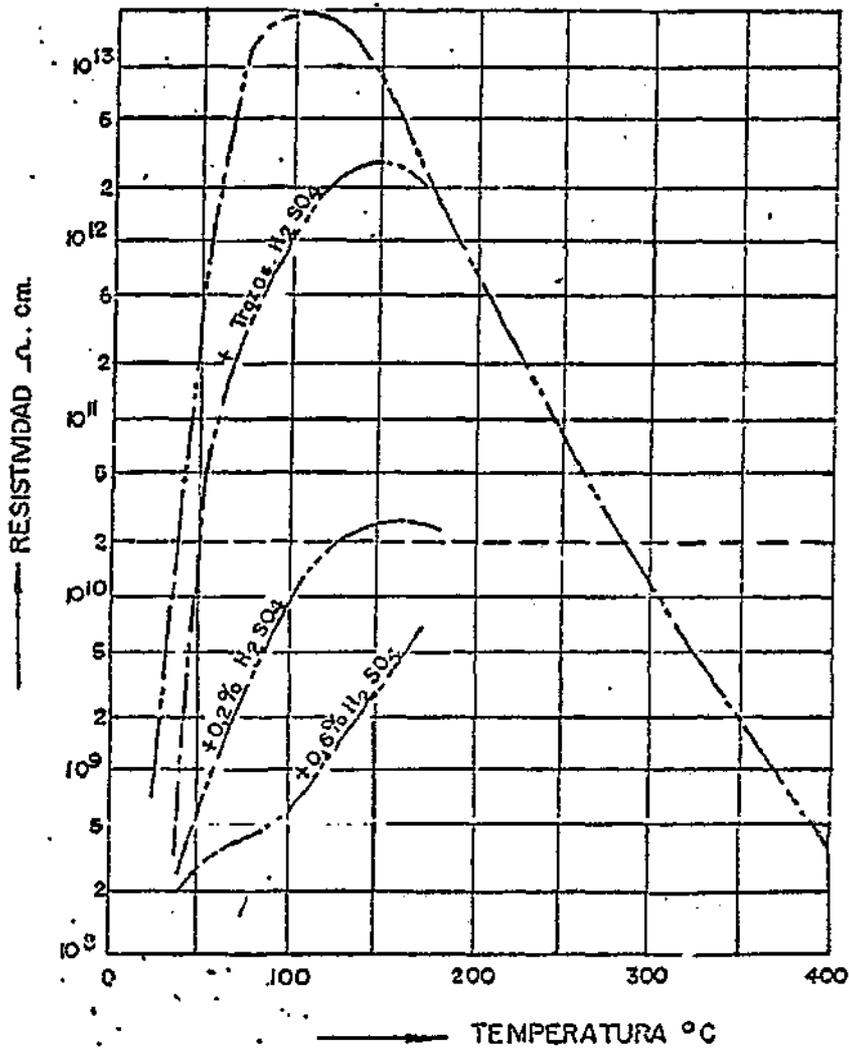


Figura. - 2.12.5.

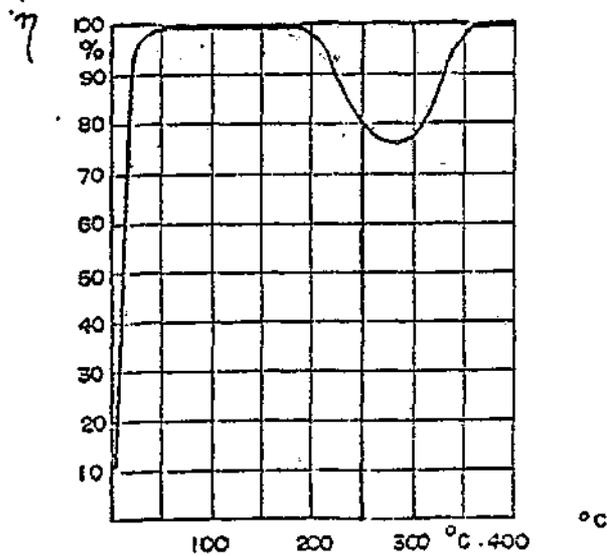


Figura. - 2.12.5.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2.1/192		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

- Influencia de la velocidad de paso

La velocidad de paso tiene una influencia decisiva en la velocidad de migración y, consecuentemente, en el rendimiento. La velocidad de paso para un electrofiltro dado, condiciona el tiempo de estancia, del cual depende directamente el rendimiento. En efecto, la expresión (3) puede escribirse de la forma :

$$\eta = 1 - e^{-\frac{WL}{VD}} \quad (5)$$

siendo :

η , e y w = los mismos de la expresión (3)

V = la velocidad de paso en m/s

L = la longitud total de los campos

D = la distancia entre electrodos de emisión y depósito

La Figura 2.12.7., muestra el efecto de las velocidades punta sobre las pérdidas del electrofiltro. Así, para una velocidad de 1,6 veces la media, las pérdidas se multiplican por dos.

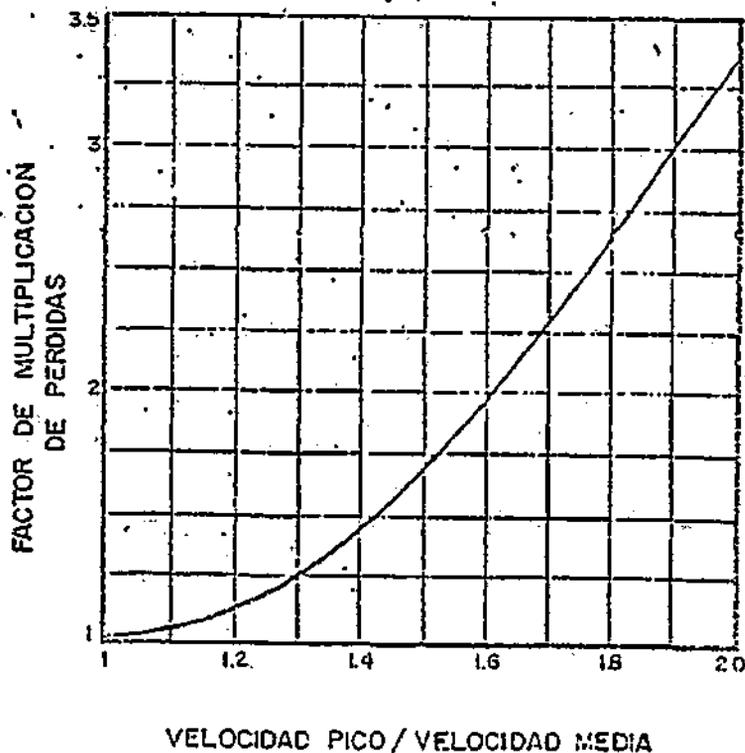


Figura. - 2.12.7.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2, / 193		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

Si se tiene en cuenta la expresión experiencial que da el rendimiento, se observa que un aumento de la velocidad del gas en ciertas partes del filtro, ocasionará una disminución del rendimiento más fuerte que el aumento que resultaría de la consiguiente disminución de la velocidad en otras partes. Por esta razón, se practican muchas veces ensayos en plantas piloto sobre las piezas de repartición de gases a la entrada de los electro-filtros.

Estas piezas de entrada, suelen disponer de deflectores y chapas perforadas perpendiculares al flujo, al objeto de lograr una distribución uniforme.

La velocidad de paso ha de ser, además, tal que no arrastre parte del polvo depositado sobre las placas de depósito. Esto se logra mediante velocidades de paso bajas, combinado con perfiles de los electrodos de depósito estudiados aerodinámicamente al objeto de evitar que el caudal de gases "lama" las paredes de los pasillos.

La Figura 2.12.8., muestra algunos de los perfiles más comunes en aplicaciones corrientes.

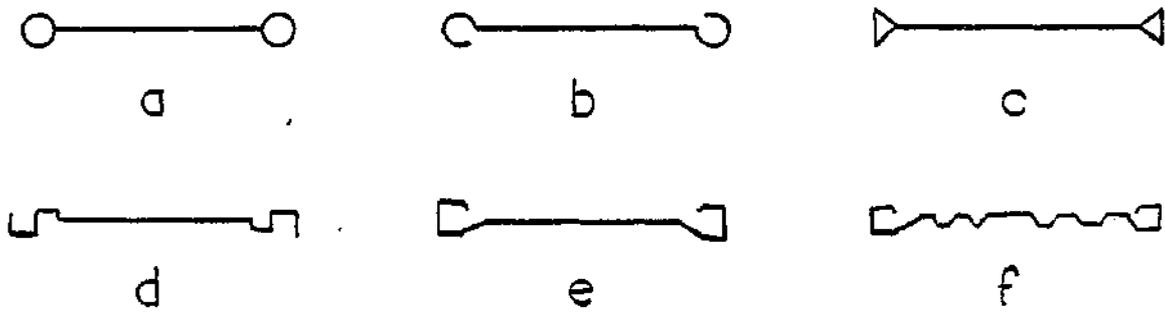


Figura 2.12.8.

- Golpeo de los electrodos

El método de golpeo de los electrodos es el más usado para desprender el polvo depositado sobre la superficie de los mismos. Suele ser una práctica común el golpear los electrodos cuando la capa de polvo depositada alcanza un espesor comprendido entre los 6 y los 12 mm. dependiendo de la resistividad del mismo. La intensidad y duración de este golpeo debe controlarse cuidadosamente, de acuerdo con las condiciones de trabajo de cada precipitador en particular, ya que condiciona la velocidad de migración según una ecuación experimental para cada aplicación de la forma :

$$w_e = w_0 - ke \quad (6)$$

siendo :

w_e y w_0 = las velocidades de migración cuando el espesor de la capa de polvo vale e y 0 mm.

k = un coeficiente particular en cada caso

e = el espesor de la capa de polvo

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 194		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E. O. I. M I N E R	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELEC- TROSTATICA	01	10	80

Hay que tener en cuenta que el polvo así separado del electrodo, no se desprende en su estado original, sino que lo hace aglomerado por las fuerzas de cohesión desarrolladas entre las partículas precipitadas, cayendo por gravedad hacia el fondo del electrofiltro.

Los elementos de golpeo se distribuyen de forma que el golpeo se produzca de forma escalonada sobre los diversos electrodos y no simultáneamente en los distintos campos.

El polvo al desprenderse y caer al fondo de las tolvas, aporta algo de polvo a la corriente gaseosa, ya que se golpea mientras el electrofiltro sigue en marcha. Al golpear por campos, el polvo que, como consecuencia del golpeo se introduce en la corriente de un campo, es captado en el campo siguiente.

Interesa pues disponer del mayor número de campos técnica y económicamente posibles, ya que afecta muy directamente al rendimiento.

Durante la ionización del polvo, se producen también partículas de polvo con carga positiva que se depositarán sobre los electrodos emisores, disminuyendo el efluvo de electrones. Es necesario golpear periódicamente los electrodos emisores para limpiarlos.

- Influencia de la forma de los electrodos emisores

La experiencia demuestra que para que un electrofiltro presente una buena estabilidad es indispensable que la separación entre la tensión que produce el efecto corona y la que produce el arco, sea lo mayor posible, lo que conduce a los constructores de electrofiltros a no sobrepasar en los electrodos de emisión cilíndricos el diámetro de 2,5 mm.

Dado, además, que la carga de las partículas depende directamente del campo existente entre electrodos, los constructores se ven obligados a hacer funcionar el electrofiltro a la mayor tensión posible, cerca del límite de arco.

Para aumentar el efecto corona se han utilizado numerosas clases de electrodos de emisión, tal como muestra la Figura 2.12.9.

Ciertos tipos de electrodos han tenido que ser abandonados, debido a la facilidad con que se colmataban de polvo, suprimiendo así todas las ventajas que tenían en origen.

Es preciso que los electrodos de emisión presenten también unas buenas características mecánicas, ya que el golpeo y el continuo salto de arcos que se producen, como se verá más adelante, pueden llegar a ocasionar, y de hecho así ocurre en la práctica, la rotura de los mismos, cortocircuitando el sistema y dejando el electrofiltro fuera de servicio.

- Regulación electrónica

Para responder a las exigencias actuales en lo que concierne a los rendimientos que se exigen, son necesarios grupos rectificadores de gran seguridad y constante de reglaje muy cortas.

Cada arco que se produce en el electrofiltro, origina una caída de la tensión, por lo que un buen grupo rectificador debe eliminar rápidamente los arcos que se formen y regular la intensidad del filtro a su valor óp-

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 195		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

timo en un lapso de tiempo definido.

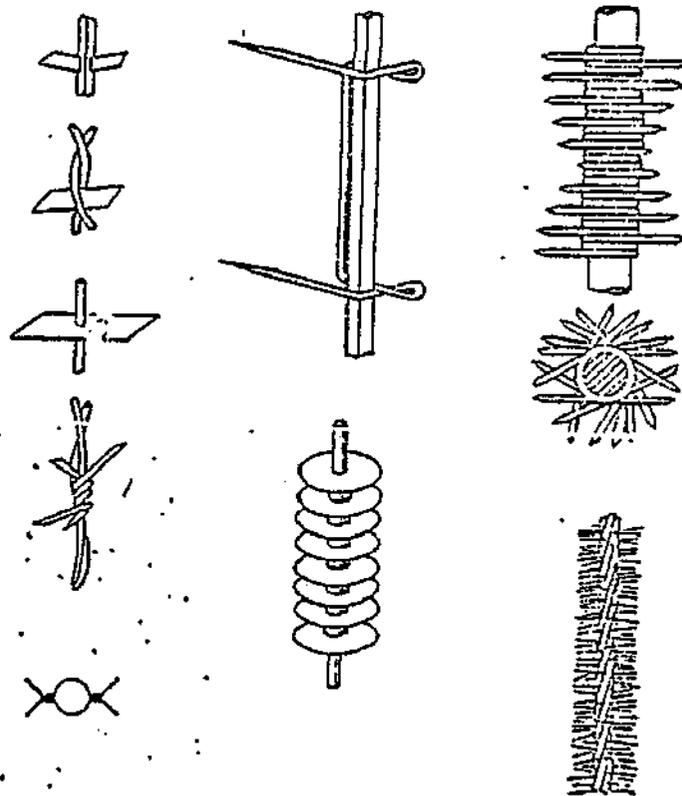


Figura. - 2.12.9.

Hace años las instalaciones se regulaban de tal manera que los arcos prácticamente no podían producirse. Actualmente las instalaciones se construyen para funcionar a una frecuencia de 2.000 a 6.000 arcos por hora, tal como indica la Figura 2.12.10.

Ya se ha indicado que el rendimiento del electrofiltro será máximo si la tensión secundaria se mantiene al máximo posible, es decir, justo por debajo de la tensión de arco. El valor efectivo de la tensión de arco no puede ser encontrado más que experimentalmente y, por ello, un dispositivo automático eleva la tensión del electrofiltro sucesivamente hasta que se produce el arco. Es necesario, pues, poder variar la alta tensión entre amplios límites.

A medida que la potencia del grupo transformador-rectificador crece, la extinción del arco se hace más problemática a igual tiempo de reglaje.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 196		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	12	CAPITULO :	DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

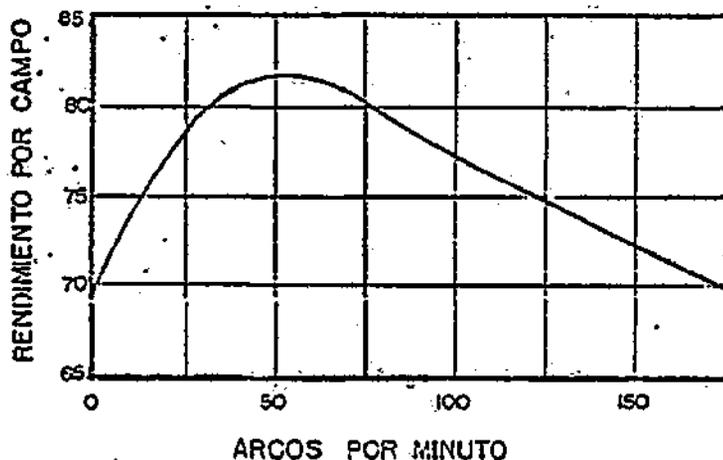


Figura. - 2.12.10.

La Figura 2.12.11, muestra un esquema simplificado del sistema de regulación por tiristores del grupo - trafo-rectificador que permite eliminar el arco en uno o dos semiperíodos y regular a continuación la intensidad en 5 a 10 semi-períodos, a fin de obtener un valor medio elevado de corriente continua. Se consigue en consecuencia, reestablecer en menos de 0,1 seg. la intensidad de marcha en el filtro.

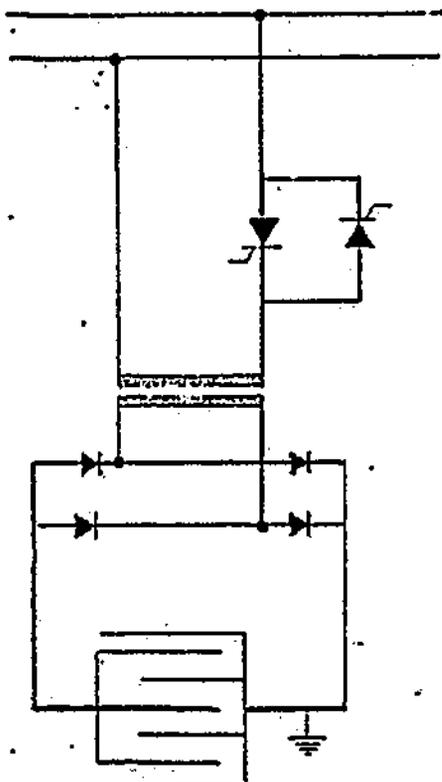


Figura. - 2.12.11.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./197		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

La regulación automática permite, según el tipo de arco producido, bajar la tensión o, incluso, cortarla temporalmente: la regulación se lleva a cabo actuando sobre la intensidad primaria del transformador mediante tiristores comandados por la tensión del secundario.

Se desprende de los anteriormente expuesto que cuanto mayor sea la potencia del grupo trafo-rectificador, - mayor será el problema de regulación.

La experiencia práctica muestra que de la combinación óptima de tensiones atendiendo al efecto corona y a la formación del arco, se llega a valores de la intensidad del secundario que, por metro cuadrado de electrodo colector, toman, para distintas aplicaciones, valores como los siguientes :

Incinerador de basuras	$i = 0,46 \text{ mA/m}^2$
Caldera de carbón	$i = 0,42 \text{ mA/m}^2$
Molino de cemento	$i = 0,40 \text{ mA/m}^2$

- Conclusiones

La velocidad de migración o constante del proceso, juega un papel fundamental al resumir todas las complejas características del fenómeno de la precipitación electrostática. En la práctica, este valor se calcula sobre los resultados medidos en instalaciones en explotación y no traduce directamente una velocidad real de las partículas medida directamente.

El valor de w , resulta de factores muy diferentes, tales como la granulometría y el análisis químico de las partículas, las características del campo eléctrico activo, la corriente y pulsación de la tensión, la frecuencia de la formación de arcos, la velocidad del gas y la presión en el filtro, la reentrada de polvo durante la limpieza por sacudida, composición química, humedad y temperatura del gas, resistividad del polvo y constante dieléctrica de las partículas, el tipo de filtro, la forma de los electrodos de emisión y depósito, así como la repartición del gas a lo largo de la sección. Todos estos factores contribuyen a determinar el valor de la velocidad de migración w . No debe, pues, olvidarse que el estado actual de la técnica no permite calcular teóricamente este valor de w .

Si representamos en papel similogarítmico la expresión (5) para distintos valores de w , obtendremos una gráfica como la de la Figura 2.12.12., en la que en ordenadas figura el rendimiento y en abcisas la superficie específica f , en metros cuadrados de electrodo de depósito por metro cúbico efectivo, por segundo de gas tratado.

Supuesto un rendimiento deseado del 99,5%, para una $w = 12 \text{ cm/s}$ se necesitaría una superficie específica de 44 m^2 por cada m^3 efectivo de gas tratado por segundo. Si la velocidad de migración se redujese a 10 cm/s , se requeriría una superficie específica de $53 \text{ m}^2/\text{m}^3/\text{s}$.

Cuanto mayor sea la velocidad de migración de cálculo menor y más barato será el electrofiltro resultante.

Ahora bien, para poder tomar como base de diseño una velocidad alta deben darse una serie de factores que optimicen la depuración, factores que comentaremos más adelante.

Para mayor facilidad de comprensión, vamos a exponer simplídicamente el sistema de cálculo de un electrofiltro.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA.2.2./198		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

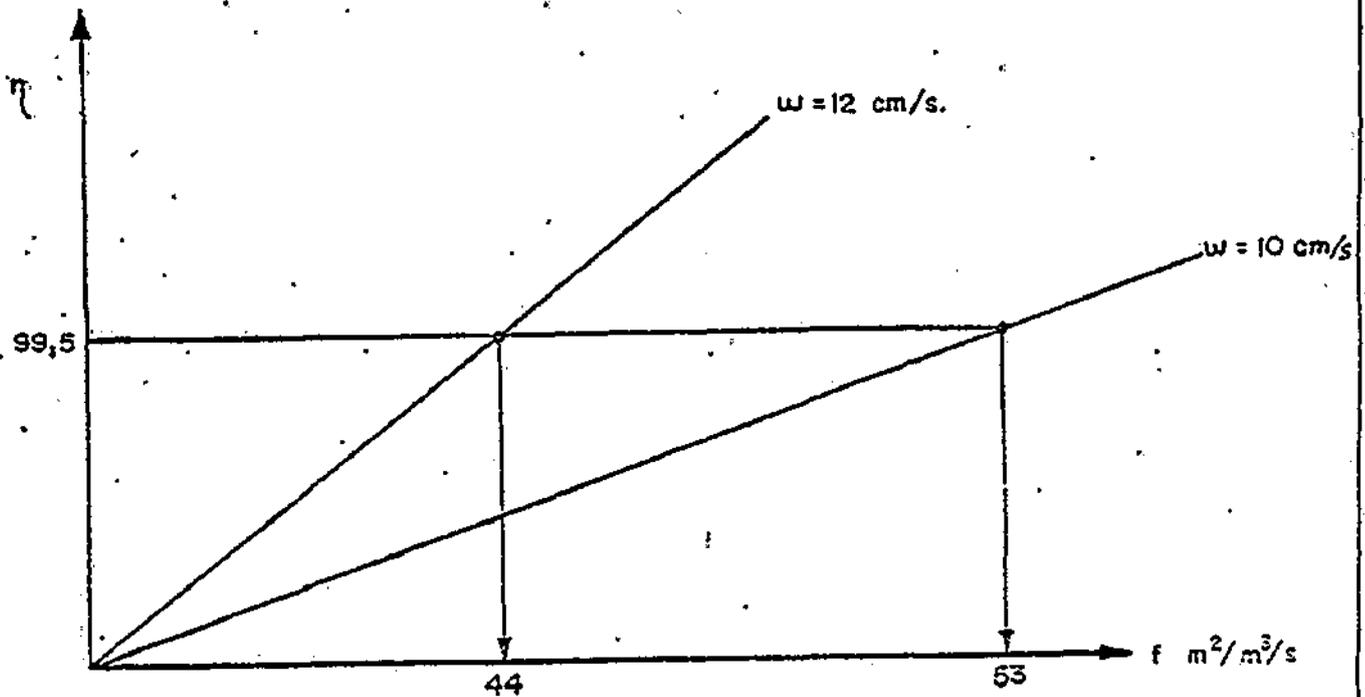


Figura. - 2.12.12.

Aún cuando en teoría un electrofiltro podría fabricarse de un único campo, factores ya descritos como :

- Necesidad de un voltaje de inicio de arco alto, lo cual limita la longitud total del electrodo emisor alimentado por el mismo grupo transformador-rectificador.
- Recuperación del polvo reincorporado durante el golpeo.
- Limitaciones constructivas en cuanto a la longitud de los electrodos colectores.
- Limitaciones de la constante de tiempo para la eliminación de arcos cuando la potencia del grupo trafo-rectificador es alta.

aconsejan para cada tipo de aplicación el número de campos, separados y alimentados cada uno de ellos, por un grupo trafo-rectificador que hay que prever.

Así pues, dado un caudal Q y un rendimiento a alcanzar η , se comienza, a la vista de las características concretas del problema en cuestión, por fijar los siguientes parámetros :

- Velocidad de migración w
- Velocidad de paso v

y una vez fijados estos parámetros de diseño, se procede como sigue : (Figura 2.12.13)

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2, / 199		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

1) Con η y w , se calcula la superficie total de depósito S , mediante la expresión (5), siendo a su vez igual a:

$$S = 2\eta H^2 N = 2\eta HL$$

2) Con Q y V se calcula Ω .

3) Conocido Ω se determinan H y A , atendiendo a razones constructivas y de repartición de gases.

4) Conocido S , se calcula la intensidad total del secundario, conociendo la intensidad específica del placa i . Una vez conocida la intensidad total I , se determina el número de campos provisional, a la vista de la potencia de los grupos trafo-rectificadores precisos.

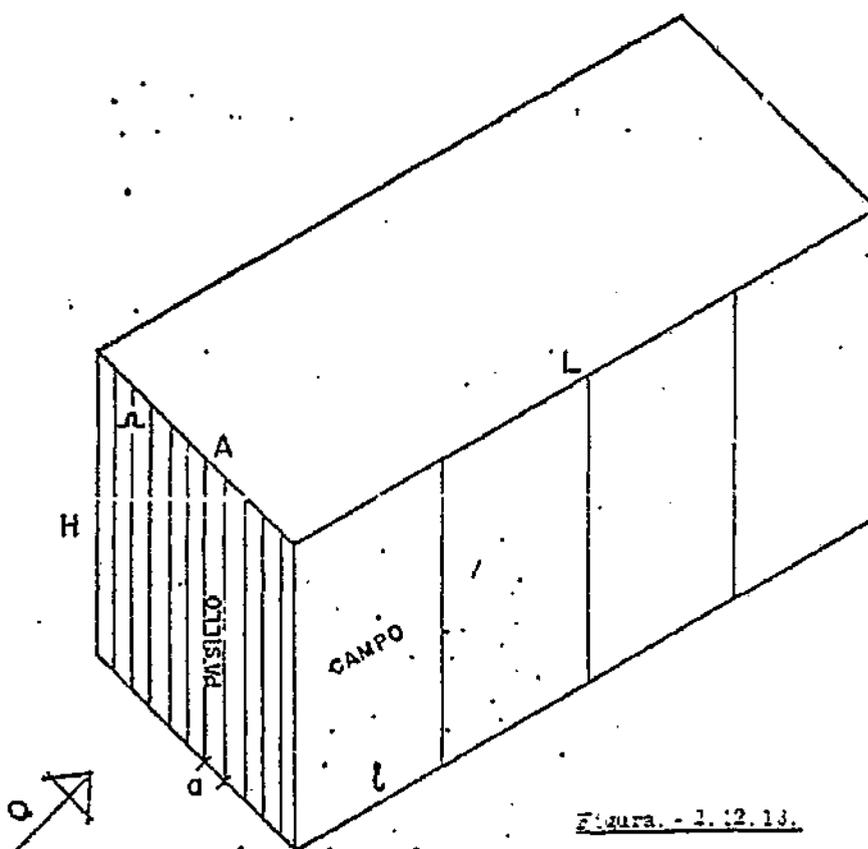
5) Conocidos H y A , se calcula una vez fijado η , la longitud total L , mediante:

$$S = 2\eta HL$$

6) Se recalcula el número de campos comprobando si $l = \frac{I}{\Omega}$ cumple con los requisitos mecánicos de construcción y de facilidad de limpieza por golpeo.

Así pues, optimizando todos los elementos de diseño el factor que condiciona el tamaño del electrofiltro es la velocidad de migración w , mientras que la velocidad de caso V afecta al dimensionamiento y la intensidad específica de placa (que es específica para cada aplicación) es el factor más influente a la hora de determinar el número de campos de precipitación separados.

Entre los elementos optimizados, figuran el diseño de los electrodos de emisión y depósito, sistema de regulación automática de la parte eléctrica, sistema de limpieza de electrodos, etc.



L = LONGITUD TOTAL
 l = LONGITUD POR CAMPO

N = NUMERO DE PASILLOS
 N = NUMERO DE CAMPOS
 Ω = H.A SECCION DE ENTRADA
 S = SUPERFICIE TOTAL DE DEPOSITO
 a = ANCHO DE CADA PASILLO

Figura. - 1.12.13.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 200		
	3	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	12	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

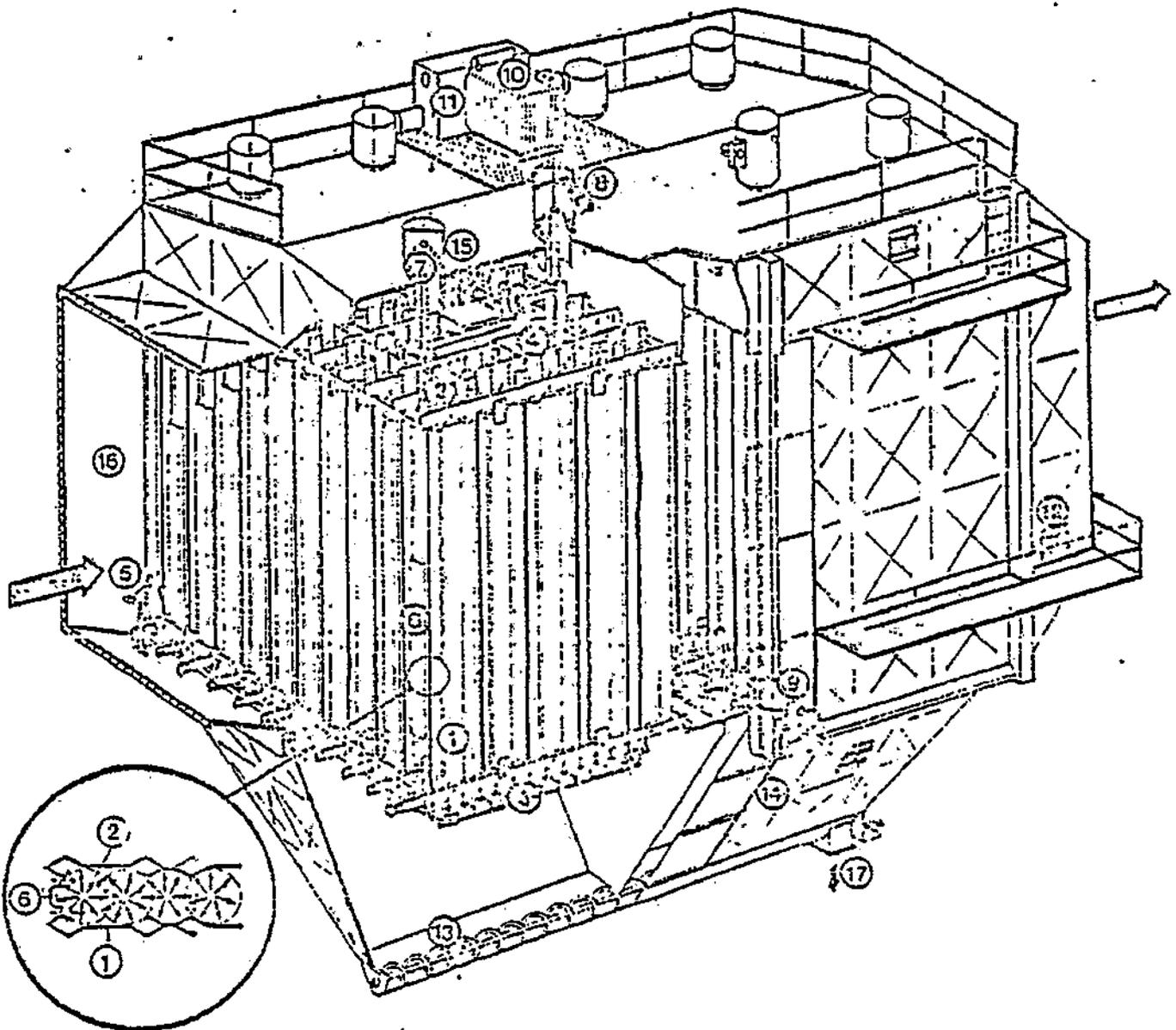


Figura. - 2.12.14. - Electrofiltro de flujo horizontal.

Fuente : Air Industrie (División Prat-Daniel).

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA:	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./201.		
	2	TEMA:	CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	12	CAPITULO:	DEFURACION DE GASES POR FILTRACION ELECTROSTATICA	01	10	80

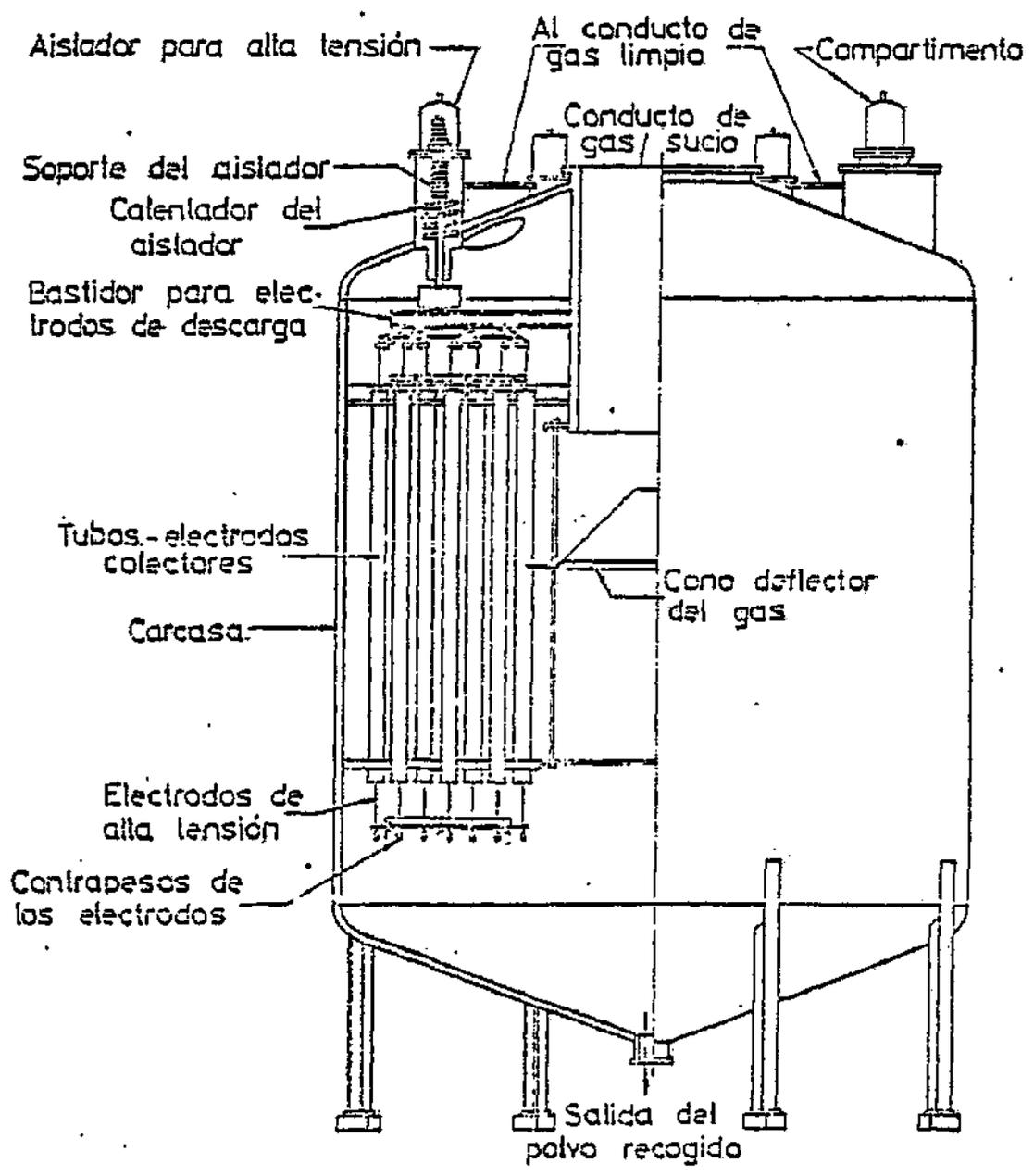


Figura. - 2.12.15. - Electrofiltro tubular.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 202		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	13	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTROS DE TEJIDO	01	10	80

La filtración es el más antiguo y, posiblemente, el más eficaz método de separación de polvo, vapores y humos de los gases que los portan.

Es especialmente interesante en aplicaciones industriales, ya que con él pueden obtenerse muy altas eficiencias con un moderado consumo de energía.

Es aplicable a las partículas de menor tamaño con los mejores resultados, frente a cualquier otro procedimiento para un consumo de energía dado, presentando además la gran ventaja de que puede devolver el producto separado al proceso sin transformación alguna y pudiendo, por tanto, ser reutilizado si económicamente interesa.

Su fundamento es muy simple, ya que en esencia y de un modo general, consiste en hacer pasar la corriente de aire cargado de polvo a través del tejido que constituye la unidad filtrante en forma cilíndrica (manga) o de bolsa, quedando retenidas aquellas partículas mayores que los intersticios existentes por simple tamizado.

En el tejido y por su parte de aire sucio, se forma una película de polvo que hace de filtro de gran eficacia capaz de retener partículas submicrónicas, mientras que el tejido filtrante sirve principalmente como soporte de esta película.

Como se ha dicho antes, las unidades filtrantes pueden ser en forma cilíndrica o de bolsas. Normalmente, cuando los caudales no son muy pequeños, se emplean las mangas cuyas dimensiones suelen ser entre 125 y 500 mm. de diámetro y entre 3 y 15 m. de longitud o altura.

Este tipo de separadores se presenta en el mercado en una gran variedad de formas, tamaños, tejidos filtrantes, etc. pero consideramos que la mejor forma de clasificarlos es según el método empleado para la limpieza de las mangas. Los más usuales son los siguientes :

- Por sacudida mecánica

Este procedimiento consiste en que una vez colmatadas las mangas de polvo y cuando, por esta razón, se alcanza una pérdida de carga en el separador preestablecida, entran en funcionamiento unos grupos motorizados que sacuden las mangas haciendo caer el polvo recogido sobre unas tolvas.

Como es natural, durante el período de limpieza, se interrumpe la filtración. Estos separadores entonces no serían aplicables para aquellos procesos en que resulta necesario su funcionamiento continuo. Este problema se ha resuelto distribuyendo las mangas en compartimentos y previendo un compartimiento más de los estrictamente necesarios, de modo que pueda haber uno en período de limpieza sin que ello salga perjudicada la eficacia del sistema. Según lo dicho, podríamos sub-dividir estos separadores en intermitentes y continuos.

Este procedimiento de sacudida mecánica, es el aplicado casi siempre a los de bolsas y se puede aplicar también, desde luego, a los de mangas.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 203		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	13	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTROS DE TEJIDO	01	10	80

- Por aire inverso

La limpieza se realiza mediante un ventilador secundario que impulsa una corriente de aire en sentido contrario al de filtración, con lo que se consigue soltar la capa de polvo depositada sobre las mangas. Para su aplicación a un proceso continuo, es necesario como en el caso anterior, disponer de algún compartimento de reserva, realizándose el aislamiento de uno u otro compartimento para su limpieza mediante un sencillo juego de válvulas.

- Por aire inverso a alta presión

Aquí también se emplea un ventilador secundario que impulsa el aire en sentido inverso al de la filtración; pero en este caso el aire incide sobre cada sección de las mangas a través de un cuadro móvil. Su movimiento es continuo de arriba a abajo. Con ello, se consigue un funcionamiento continuo sin necesidad de tener más superficie filtrante que la estrictamente necesaria.

- Por pulsaciones de aire comprimido

En este caso, el funcionamiento también es continuo sin necesidad de disponer de compartimentos extra. La limpieza se realiza por pulsaciones periódicas de aire comprimido que sin detener la filtración desprenden el polvo acumulado en las mangas con la frecuencia necesaria para que la pérdida de carga a través del separador no supere los límites preestablecidos.

- Por ondas sonoras de baja frecuencia

Es el método más avanzado y también el menos experimentado. La separación del polvo acumulado en el entramado de dicho tejido se realiza por la vibración producida por un generador de sonidos de baja frecuencia. Este método fue pensado especialmente para tejidos de fibra de vidrio, ya que produce una muy baja abrasión sobre la fibra y permite que la temperatura de trabajo sea superior a los 260°C.

Las Figuras 2.13.1., 2.13.2., 2.13.3. y 2.13.4., muestran algunos dibujos esquemáticos de los distintos métodos de limpieza de los que venimos hablando.

Un tema muy importante a considerar en este tipo de separadores, es la llamada velocidad de filtración, que podemos definir como la relación entre el caudal de aire tratado y la superficie filtrante útil. Viene medido en $m^3/h/m^2$ o, más comunmente en m/min. y f.p.m.

Como puede comprenderse, la velocidad de filtración es factor determinante para la elección del tamaño del separador.

Es función de una multitud de factores como son: composición química del polvo tratado, densidad (real y aparente), concentración, humedad, tejido empleado, etc. Los diseñadores de estos equipos disponen de amplia información básicamente experimental para la determinación de este ratio en cada caso concreto. De un modo muy general, podemos decir que los de sacudida mecánica suelen emplear relaciones entre 2 y 10 f.p.m. y que en los de aire comprimido oscilan entre 5 y 16 f.p.m.

Otro factor fundamental a la hora de determinar un separador de mangas para una aplicación concreta, es el tejido del que han de estar confeccionadas dichas mangas.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./204		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	13	CAPITULO :	DEPURACION DE GASES POR FILTROS DE TEJIDO	01	10	80

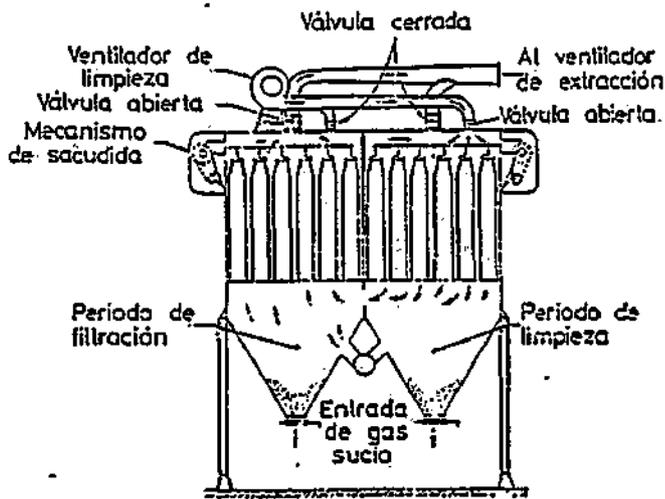


Fig. 2.13.1.- Filtro de mangas empleando aire inverso y sacudida mecánica para su limpieza.

Fig. 2.13.2.- Filtro de paneles a bolsas.

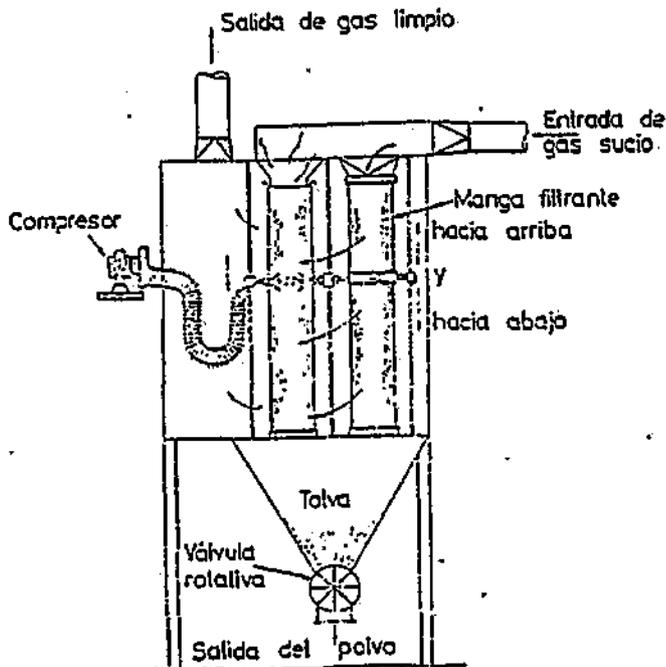
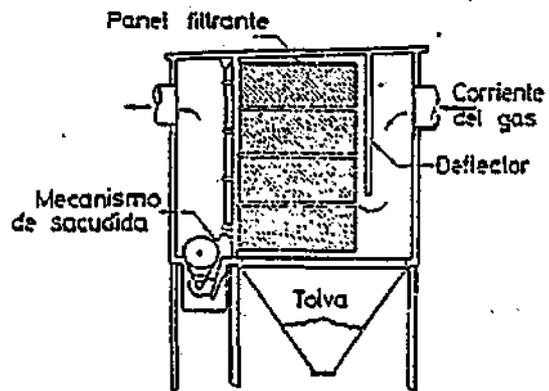


Fig. 2.13.3.- Filtro con limpieza por soplado a contracorriente.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA:	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2 / 205.		
	2	TEMA:	CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	13	CAPITULO:	DEPURACION DE GASES POR FILTROS DE TEJIDO	01	10	80

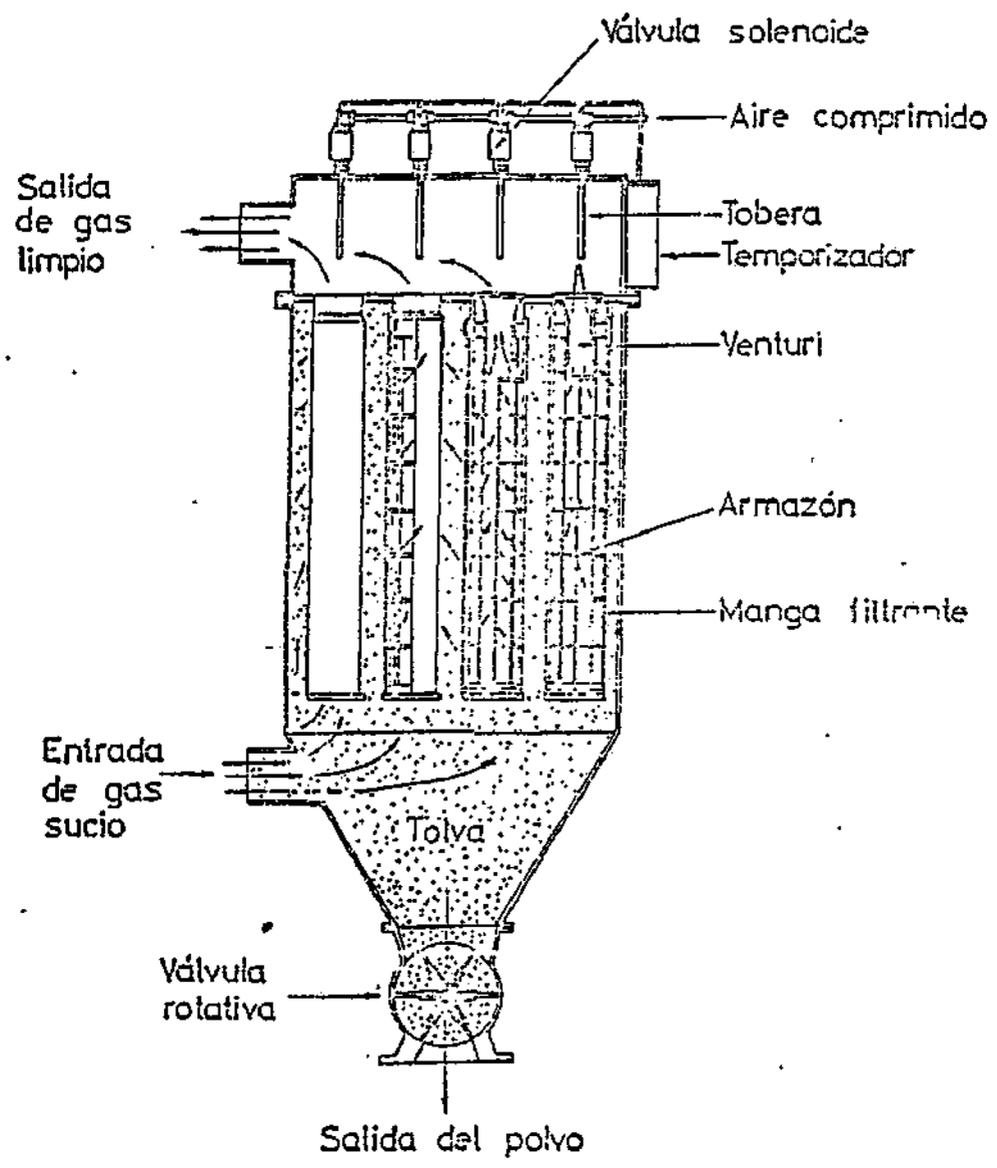


Figura. - 2.13.4. - Filtro con limpieza por sopiado con aire comprimido.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./206.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	13	CAPITULO: DEPURACION DE GASES POR FILTROS DE TEJIDO	01	10	80

· TABLA 2.13.1

Velocidades de filtración máximas recomendadas y velocidades mínimas de arrastre de polvo.

Poivo	Veloc. máxima de filtración pie ³ /min/pie ² tejido	Velocidad en las tuberías (pies/min.)	Poivo	Veloc. máxima de filtración pie ³ /min/pie ² tejido	Velocidad en las tuberías (pies/min.)
Alumina	2,25	4.500	Min. de hierro	2	4.500 a 5.000
Cx. de aluminio	2	4.500	Cx. de hierro	2	4.500
Abrasivos	3	4.500	Cuero	3,50	3.500
Asbestos	2,75	3.500 a 4.000	Trituración de cemento	1,50	4.500
Pulido ruedas	3 a 3,25	3.500 a 4.000	Molienda	2,25	4.000
Bauxita	2,50	4.500	Cintas transportadoras	2,50	4.000
Poivo bronce	2	5.000	Empaquetados	2,75	4.000
Carbón	2	4.000 a 4.500	Piedra caliza	2,75	4.500
Coque	2,25	4.000 a 4.500	Cx. de plomo	2,25	4.500
Carbón	2,25	4.500	Cal	2,	4.000
Cacao	2,25	4.000	Manganeso	2,25	5.000
Chocolate	2,25	4.000	Marmol	3,	4.500
Corcho	3	3.000 a 3.500	Mica	2,25	4.000
Cerámica	2,59	4.000 a 4.500	Pinturas, pigmentos	2	4.000
Arcilla	2,25	4.000 a 4.500	Papel	3,50	3.500
Min. de Cromo	2,50	5.000	Plásticos	2,50	4.500
Algodón	3,50	3.500	Cuarzo	2,75	4.500
Cosméticos	2	4.000	Roca	3,25	4.500
Limpiador	2,25	4.000	Arena	3,25	4.500
Alimentos y grano	3,25	3.500	Sflice	2,75	4.500
Feldespato	2,50	4.000 a 4.500	Jabón	2,25	3.500
Fertilizante (en sacado)	2,40	4.000	Almidón	2,25	3.500
Fertilizante (en friador, secador)	2	4.500	Azucar	2,25	4.000
Fluor	2,50	3.500	Saponita	2,25	4.000
Pedernal	2,50	4.500	Talco	2,25	4.000
Vidrio	2,50	4.000 a 4.500	Tabaco	3,50	3.500
Granito	2,50	4.500	Madera	3,50	3.500
Yeso	2,50	4.000			
Grafito	2,	4.500			

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2./ . 207.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	13	CAPITULO: DEPURACION DE GASES POR FILTROS DE TEJIDO	01	10	80

TABLA 2.13.2

Temperatura	Tipo de entramado (1)	Temperatura máxima	Resistencia a los ácidos (2)	Resistencia a los fluoruros	Resistencia a los alcalinos	Resistencia a la abrasión por flexión
Algodón	G	180 F	M	M	B	MB
Lana	G	215 F	MB	M a R	M	R
Nylon	F. H.	225 F	M	M	E	E
Dynel	F. H.	160 F	B	M	B	R a B
Polipropileno	F. H.	200 F	E	M	E	E
Orlón	H	250-275 F	B a E	M a R	R a B	B
Dacrón	F. H.	275 F	B	M a R	B	MB
Nomex	F. H.	400 F	M a R	M	E	E
Teflón	F. H.	400-450 F	E	M a R	E	R
Fibra vidrio	F. H. A.	550 F	R a B	M	R a B	R

(1) G: grapa; F: filamento; H: hilado; A: abultado.

(2) M: mala; R: regular; B: buena; MB: muy buena; E: excelente.

TABLA 2.13.3

Ratios usuales de filtración.

POLVO	Relación ft ³ /m/ft ² tejido			POLVO	Relación ft ³ /m/ft ² tejido		
	limpieza por sacudida mecánica	limpieza por aire a presión	limpieza por aire a contracarte.		limpieza por sacudida mecánica	limpieza por aire a presión	limpieza por aire a contracarte.
Alumina	2.5-3.0	8-10	-	Cuero	3.5-4.0	12-15	-
Asbestos	3.0-3.5	10-12	-	Cal	2.5-3.0	10-12	1.6-2.0
Bauxita	2.5-3.2	8-10	-	Pied. caliza	2.7-3.3	8-10	-
Cbn. negro	1.5-2.0	5-6	1.1-1.5	Mica	2.7-3.3	9-11	1.8-2.0
Carbón	2.5-3.0	8-10	-	Pint. pigms.	2.5-3.0	7-8	2.0-2.2
Cacao, Chocolate.	2.8-3.2	12-15	-	Papel	3.5-4.0	10-12	-
Arcilla	2.5-3.2	9-10	1.5-2.0	Plásticos	2.5-3.0	7-9	-
Cemento	2.0-3.0	8-10	1.2-1.5	Cuarzo	2.8-3.2	9-11	-
Cosméticos	1.5-2.0	10-12	-	Roca	3.0-3.5	9-10	-
Frita de esmalte.	2.5-3.0	9-10	1.5-2.0	Arena	2.5-3.0	10-12	-
Alimentos, granos.	3.5-5.0	14-15	-	Madera	3.5-4.0	12-15	-
Feldespatos	2.2-2.8	9-10	-	Silice	2.3-2.8	7-9	1.2-1.5
Fertilizants.	3.0-3.5	8-9	1.8-2.0	Pizarra	3.5-4.0	12-14	-
Fluor	3.0-3.5	12-15	-	Jabón, detergentes.	2.0-2.5	5-6	1.2-1.5
Grafito	2.0-2.5	5-6	1.5-2.0	Espacias	2.7-3.3	10-12	-
Yeso	2.0-2.5	10-12	1.8-2.0	Almidón	3.0-3.5	8-9	-
Min. hierro	3.0-3.5	11-12	-	Azucar	2.0-2.5	7-10	-
Cx. de hierro	2.5-3.0	7-8	1.5-2.0	Talco	2.5-3.0	10-12	-
Sulf. hierro	2.0-2.5	6-8	1.5-2.0	Tabaco	3.5-4.0	13-15	-
Cx. de plomo	2.0-2.5	6-8	1.5-1.8	Cx. de Cinc	2.0-2.5	5-6	1.5-1.6

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./208		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	13	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTROS DE TEJIDO	01	10	80

Actualmente, la utilización de fibras naturales es cada vez más restringida, generalizándose el uso de las fibras artificiales.

La elección de un tipo u otro de tejido recaerá sobre aquél que cumpla mejor frente a las características físicas y químicas del polvo manejado. Los factores que más frecuentemente condicionan esta elección, son los siguientes :

- Temperatura
- Humedad
- Peso específico
- Resistencia a los ácidos
- Resistencia a los álcalis
- Resistencia a los disolventes orgánicos
- Resistencia a la abrasión

Normalmente, la denominación de las fibras utilizadas responde a nombres comerciales. Sería extendernos mucho tratar de recoger aquí, de un modo exhaustivo, todas las fibras que actualmente se utilizan en la industria.

A continuación, exponemos una pequeña relación de tipos de tejidos clasificándolos por orden de resistencia a la temperatura independientemente de otros factores citados, así como de otro fundamental: su precio.

Fibra	Tem. Máx. en °C
Algodón	85
Lana	100
Nylon	110
Orlón	120
Poliétileno	120
Polivinilo	120
Dacrón	145
Nomex	230
Fibra de vidrio	290

- Pérdida de carga

La pérdida de carga depende de una serie de factores propios del polvo y otras dependencias del tejido y del sistema de limpieza empleado. De una forma muy general, diremos que normalmente oscila para un separador de mangas entre los 25 y 200 mm. c.a.

13.1. APLICACIONES

Condicionantes económicos aparte, diremos que estos tipos de separadores pueden atender prácticamente a todas las aplicaciones industriales. De todas ellas, seleccionaremos por tipos de industria, las siguientes :

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2, 2, / 209		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	13	CAPITULO : DEPURACION DE GASES POR FILTROS DE TEJIDO	01	10	80

- Cerámica : (Manejo de materiales, pulido, cribado, etc.)

Los más usados son los de sacudida mecánica y los de pulsaciones de a. c.

- Química : (Manejo, cribado, pesaje, hornos, secaderos, etc.)

En casos de gases a temperatura ambiente o media: sacudida mecánica y pulsaciones, en las demás, se emplean los de aire inverso, previo tratamiento.

- Fundición : (Manejo de arenas, colada, desmoldeo, molienda, etc.)

Para estos casos, se han utilizado hasta ahora los de sacudida. Para cubilotes, metales no férreos, etc. los de aire inverso, previo tratamiento.

- Transformados metálicos :

Todos los tipos dependiendo de factores ajenos a la propia filtración (espacio, precio, disponibilidad de a. c., etc.).

- Farmacia :

Los de pulsación de a. c.

- Alimentación :

Los de pulsación de a. c.

- Minerías y canteras :

Sacudida mecánica y pulsaciones de a. c.

- Goma y plásticos :

Sacudida mecánica y pulsaciones de a. c.

- Madera :

Sacudida mecánica.

- Ácerías :

B.O.F., Hornos Eléctricos (grandes), Bóveda abierta.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 210		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

14.1. CONCEPTOS BASICOS

Al movimiento de un fluido se le llama flujo; el tipo de flujo de un fluido puede clasificarse en muchas formas pero aquí nos limitaremos a dos clases únicamente: los llamados flujo laminar y flujo turbulento.

En el flujo laminar las partículas del fluido se mueven a lo largo de trayectorias uniformes y definidas que pueden ponerse de manifiesto con ayuda de trazadores coloreados o de otras clases.

El flujo turbulento es con mucho, el más común en ingeniería y, como luego demostraremos, es el único que existe en los conductos de ventilación; se caracteriza porque las partículas de fluido se mueven siguiendo trayectorias muy irregulares y por la aparición de un gran número de torbellinos que se forman y se destruyen constantemente en el seno de la corriente fluida; la velocidad en cada punto del fluido no es constante, como ocurre en el flujo laminar, sino que varía aleatoriamente con el tiempo, oscilando alrededor de su valor medio (Figura 2.14.1.).

El tipo de flujo existente en una conducción, puede deducirse del valor del número de Reynolds correspondiente, que en el caso de conductos se define como :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

donde :

- ρ = densidad del fluido
- D = diámetro del conducto
- v = velocidad del fluido
- μ = viscosidad

Cuando el número de Reynolds es inferior a 2.100, el flujo es laminar; para valores superiores a 4.000, ordinariamente el flujo es turbulento.

En la zona intermedia se encuentra una región de transición en la que el tipo de flujo puede ser laminar o turbulento, dependiendo de las condiciones de entrada al tubo y de la distancia medida a partir de la entrada.

En el caso del aire, en las condiciones usuales en un conducto de ventilación, el flujo es siempre turbulento. En efecto, los valores normales de cada una de las variables que intervienen en el número de Reynolds son:

- $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ (a 20°C y 760 mm Hg)
- v = 5 - 20 m/s
- D = 0,1 - 1 m.
- $\mu = 0,18 \cdot 10^{-4} \text{ kg/seg m}$ (a 20°C y 760 mm Hg)

de donde obtenemos los siguientes valores mínimo y máximo "normales" del número de Reynolds.

$$(Re)_{\min} = 3,24 \times 10^4$$

$$(Re)_{\max} = 13,4 \times 10^5$$

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2, 2. / 211		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

El hecho de que en condiciones ordinarias el flujo de aire en una conducción sea siempre turbulento, es importante, pues permite utilizar formas simplificadas de algunas ecuaciones, como más adelante estudiaremos.

14.2. ECUACIONES FUNDAMENTALES

Las ecuaciones fundamentales del movimiento de los fluidos, se obtienen como resultado de la aplicación a éstos de los principios básicos de la Mecánica; en lo que sigue, nos limitaremos a comentar las ecuaciones obtenidas en función de sus aplicaciones a la ventilación.

14.2.1. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad se basa en el principio de la conservación de la masa del fluido que circula por un conducto (Figura 2.14.2.) y se expresa :

$$\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2$$

donde :

- ρ_1, ρ_2 = densidades respectivas en las secciones 1 y 2.
- v_1, v_2 = velocidades medias respectivas en las secciones 1 y 2.
- S_1, S_2 = area del conducto en las secciones.

En las condiciones usuales en una instalación de ventilación, la densidad del aire puede considerarse constante, como probaremos en seguida, por lo que la ecuación se reduce a :

$$v_1 S_1 = v_2 S_2$$

que indica que el caudal de aire a lo largo de una conducción, puede considerarse constante.

La hipótesis de invariabilidad de la densidad que hemos efectuado, se apoya en el hecho de que las variaciones de presión que sufre el aire en una instalación de ventilación raramente superan 0,1 atmósferas, lo que respecto a la presión normal de 1 atm. representa una variación máxima del 10%; y puesto que la densidad de un gas (supuesto perfecto y a temperatura constante) es directamente proporcional a la presión, se deduce que la variación máxima de la densidad será del orden del 10%, variación que puede ser despreciada sin introducir usualmente errores importantes.

14.2.2. Ecuación de Bernouilli

La ecuación de Bernouilli se obtiene de la aplicación al movimiento del fluido de la segunda Ley de Newton, efectuando ciertas hipótesis, las más importantes de las cuales son, para nosotros, que se trate de fluidos incompresibles y sin rozamiento interno; en tales condiciones se llega a una expresión que, suponiendo además régimen turbulento en la conducción es :

$$\rho g h + \rho + \frac{\rho v^2}{2} = \text{constante}$$

donde ρ y v , tienen los valores ya indicados, g , es la aceleración de la gravedad, h , la altura respecto a

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 212		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

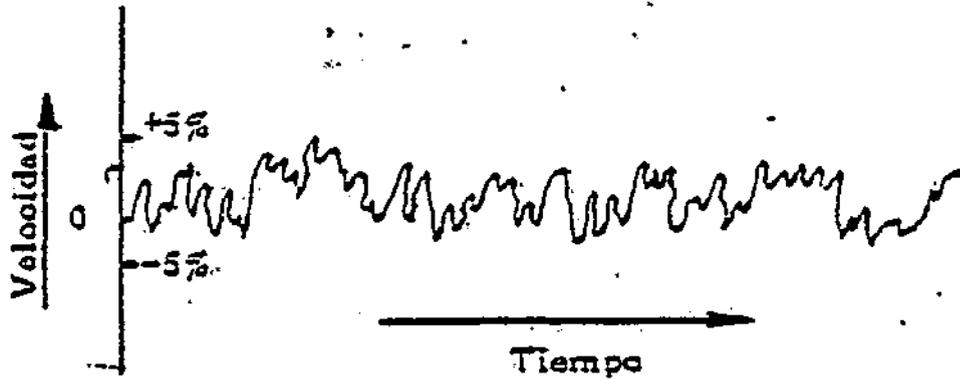


Figura. - 2.14.1. - Fluctuaciones de velocidad en el flujo turbulento. El origen del eje de coordenadas corresponde al valor medio de la velocidad.

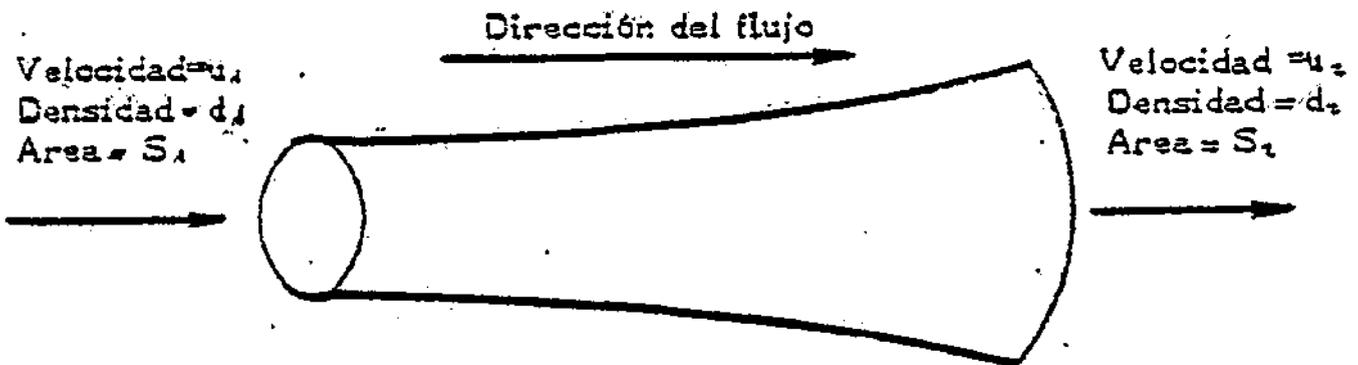


Figura. - 2.14.2. - Continuidad.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 213		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

una referencia arbitraria y p , es la presión que marcaría un manómetro colocado en la pared de la conducción.

Puesto que cada uno de los términos de la expresión anterior tienen dimensiones de energía por unidad de volumen, la ecuación de Bernoulli expresa que la energía del fluido, en ausencia de trabajo externo y de rozamiento, es constante a lo largo de la conducción; en general, cuando se trata de gases, el término $\rho g h$, puede despreciarse frente a los demás, con lo que el teorema de Bernoulli se reduce a :

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = \text{constante}$$

Al término p , suele denominársele presión estática; y al $\rho v^2/2$, presión dinámica de la corriente fluida, la suma de ambas se llama presión total. Las tres magnitudes son directamente medibles mediante los montajes que se indican en la Figura 2.14.3.

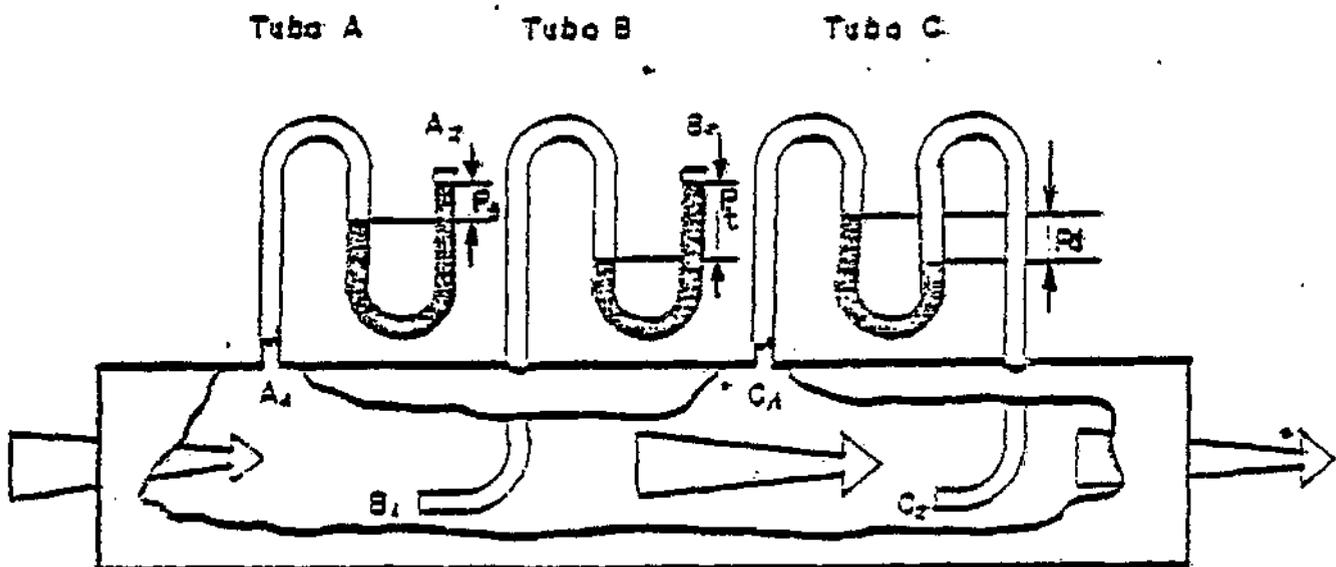


Figura. - 2.14.3. - Medida de las presiones estática, dinámica y total.

Sin embargo, todos los fluidos reales poseen rozamiento interno, por lo que en su movimiento aparecen tensiones que transforman la energía mecánica en térmica; la ecuación de Bernoulli puede aplicarse a un fluido real añadiéndole un término adicional que tiene en cuenta esta pérdida de energía mecánica. Si se considera un punto 1, aguas arriba y un punto 2, aguas abajo, la energía por unidad de volumen en 1 es igual a la energía por unidad de volumen en 2, más la energía perdida entre los dos puntos:

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./214		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \text{pérdidas}$$

Reescribiendo la ecuación anterior se obtiene :

$$P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} = P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} - \text{pérdidas}$$

que nos indica que las pérdidas representan una disminución de la presión total que se va produciendo a lo largo de la conducción; a esta disminución se la denomina pérdida de carga concepto que estudiaremos con detalle a continuación.

14.3. PERDIDA DE CARGA

14.3.1. Tuberías rectas

La pérdida de carga en tramos rectos de tuberías en las que el régimen es turbulento, se calcula mediante la ecuación de Darcy-Weisbach :

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2g}$$

donde :

- h_f = pérdida de carga en energía por unidad de volumen
- L = longitud de la tubería
- D = diámetro de la tubería
- ρ = densidad del fluido
- v = velocidad media
- g = aceleración de la gravedad

El coeficiente f , es una magnitud sin dimensiones que depende de la velocidad v , del diámetro D , de la densidad ρ , de la viscosidad μ y de ciertas características de la rugosidad de la pared.

La experiencia junto con el análisis dimensional, han demostrado que f , puede considerarse con una aproximación aceptable como función únicamente del número de Reynolds y de una medida de la rugosidad, la rugosidad relativa, ϵ/D , que es el cociente entre el tamaño de las proyecciones rugosas de la tubería y el diámetro de la misma, D . Dicha función se representa gráficamente en la Figura 2.14.4.

En aplicaciones de ventilación, donde la rugosidad de los conductos varía poco de unas aplicaciones a otras, es usual emplear gráficos en los que en función de la velocidad y el diámetro del conducto, se lee directamente el valor de la pérdida de carga por unidad de longitud del mismo. (Figuras 2.14.5. y 2.14.6.).

En dichos gráficos y en general en los cálculos de ventilación, es usual expresar las pérdidas de carga en milímetros de columna de agua, unidad de presión cuya equivalencia en unidades mks es $9,8 \text{ newton/m}^2$ y en unidades técnicas 1 kg/m^2 .

Cuando se trata de conductos de sección rectangular, los cálculos de pérdida de carga se efectúan considerando los como circulares y con el valor del diámetro que se obtiene de la Figura 2.14.7.

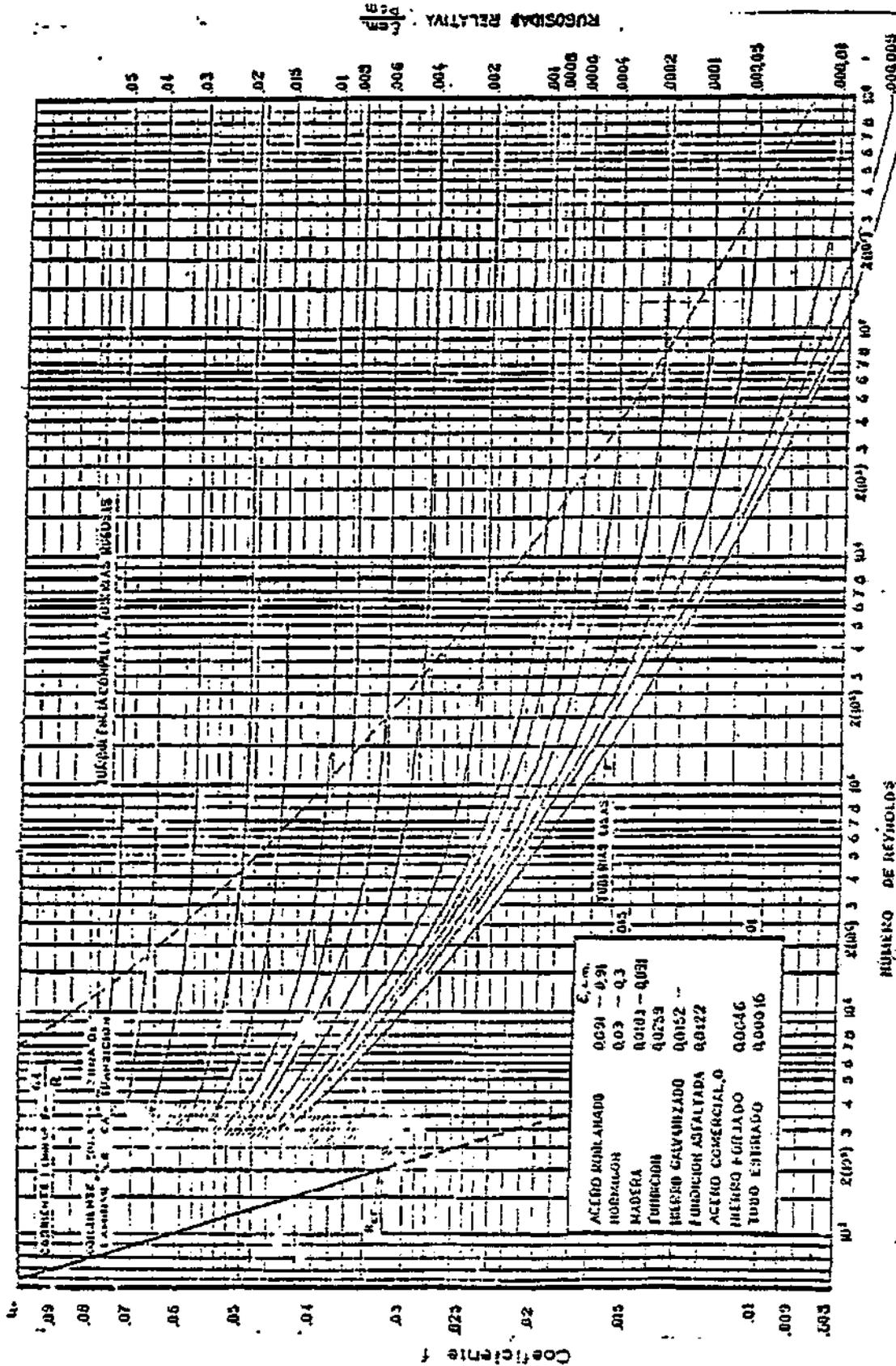
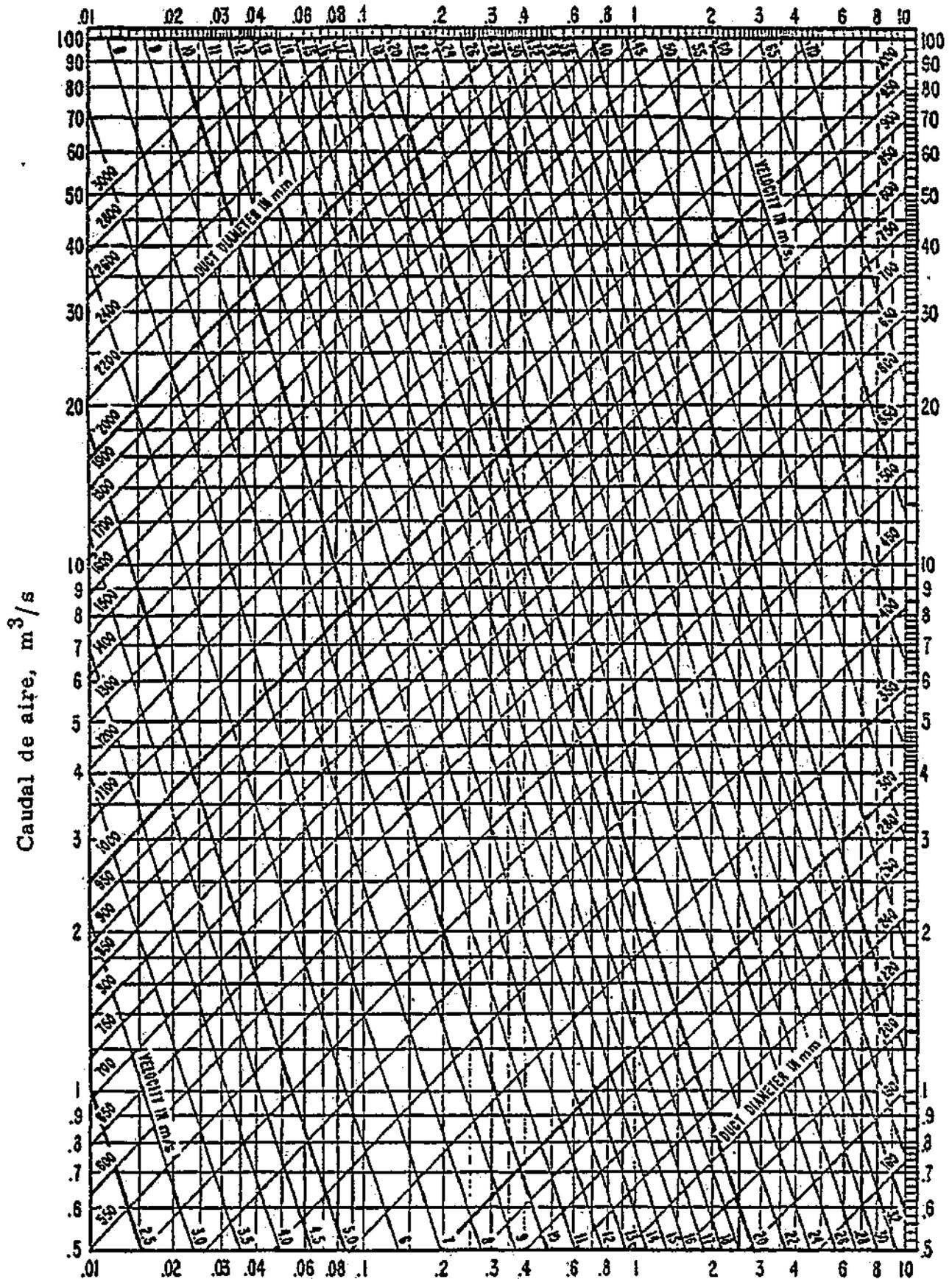


Figura. - 2.14.4. - Valores del factor de fricción, f , en función del número de Reynolds y del tipo de tubería.



Caudal de aire, m³/s

Pérdida de carga, mm cda por metro de conducto.

Figura. - 2.14.6. - Pérdida de carga en conductos rectos, caudales altos;

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 216		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER.	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

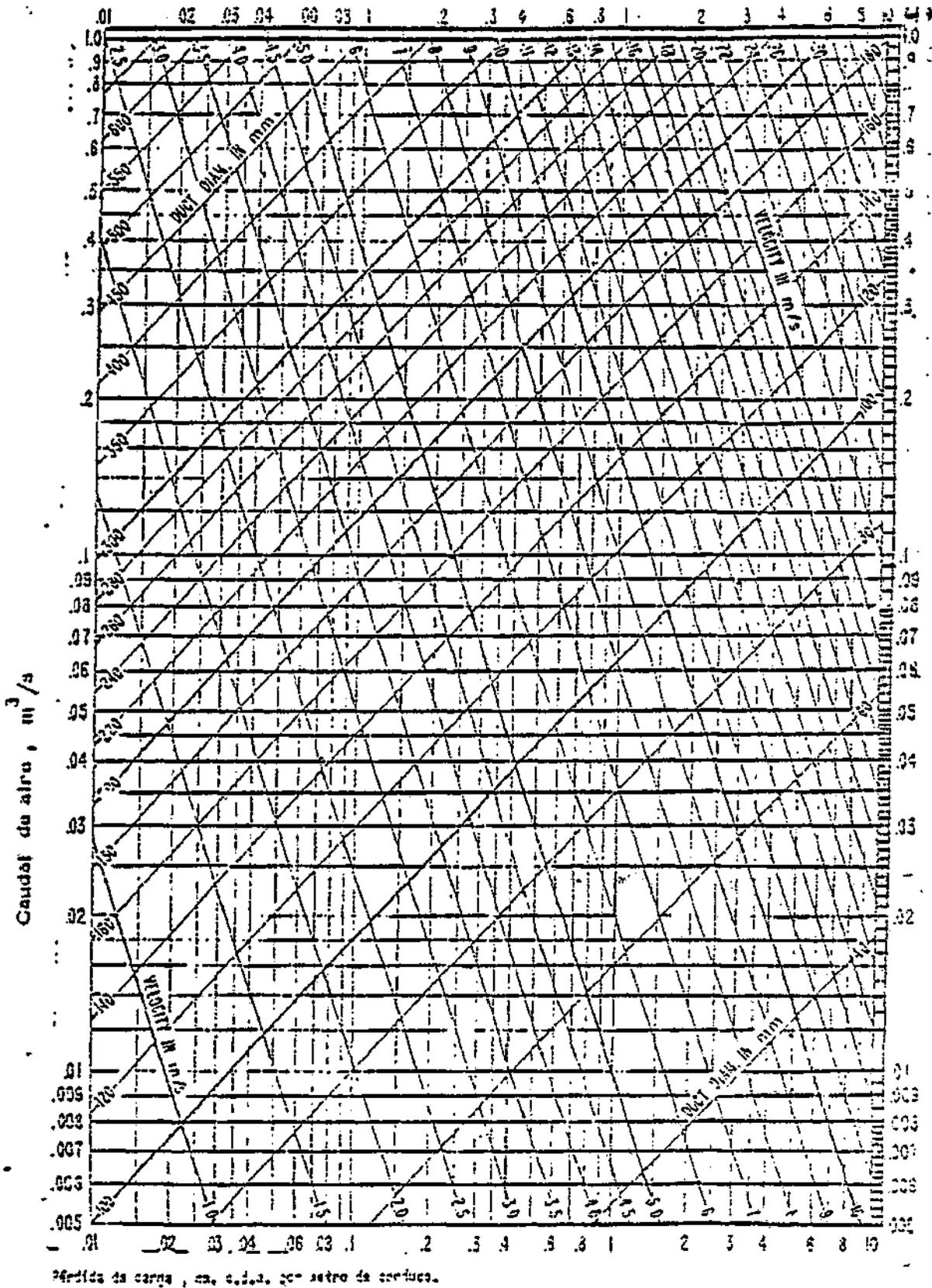


Figura. - 2.14.5. - Pérdida de carga en conductos rectos (caudales caños)

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2. / 218		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	30

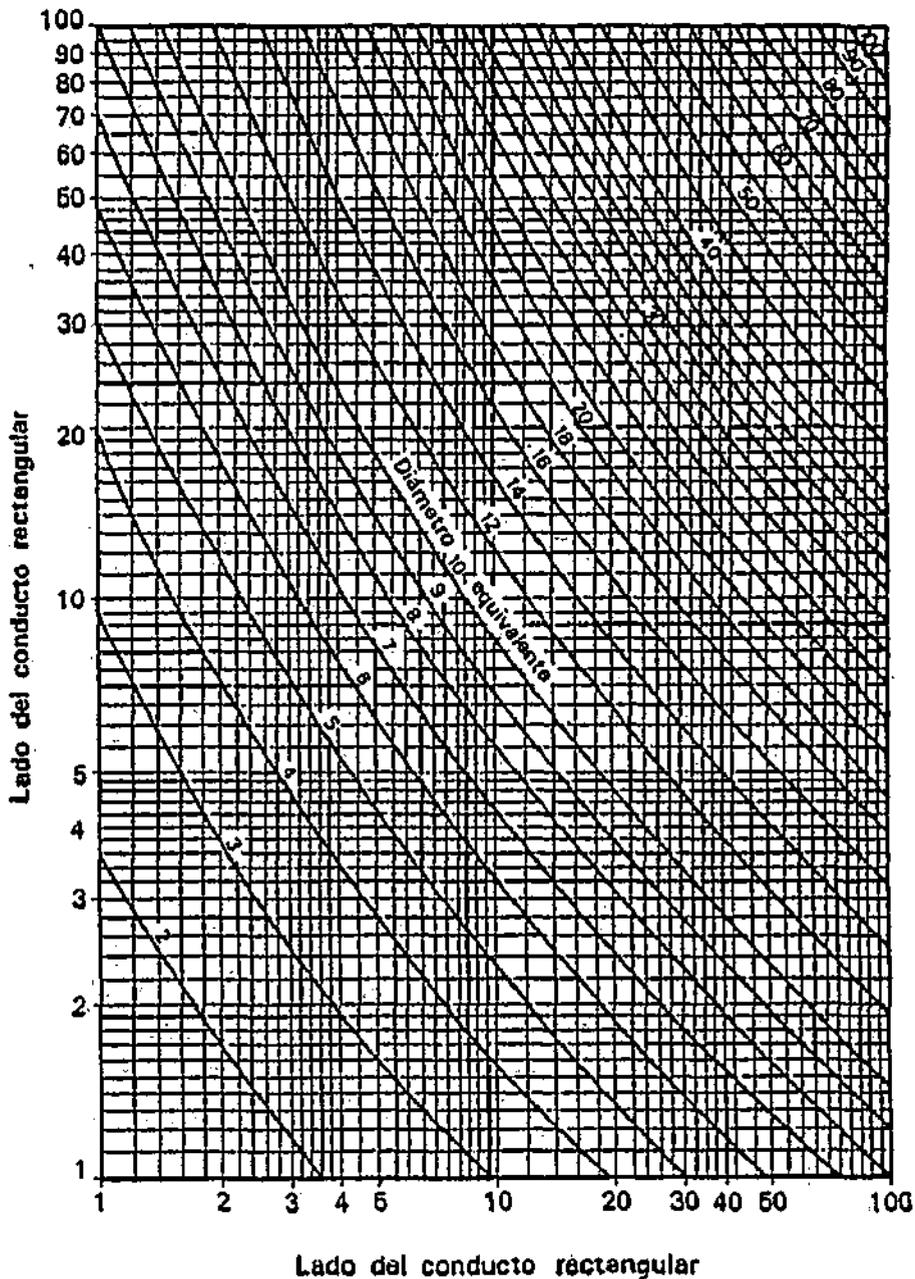


Figura. - 2.14.7. - Equivalencia entre conductos circulares y rectangulares para igual fricción y capacidad.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 219		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

14.3.2. Puntos singulares

Denominaremos punto singular de una conducción a cualquier zona de la misma que no sea recta o de sección constante; bajo tal denominación se comprenderán pues los codos, ensanchamientos y estrechamientos, las uniones, etc. La pérdida de carga en los puntos singulares, se determina experimentalmente; los resultados se presentan en dos formas distintas empleándose una u otra, según el método de cálculo que se vaya a emplear en el diseño de las conducciones, tal como se explicará en el tema correspondiente.

La primera forma consiste en expresar la pérdida de carga producida por un punto singular como la longitud de tubería recta que daría lugar a una pérdida de carga idéntica; a dicho valor se le llama la longitud de tubería recta equivalente del punto singular o, abreviadamente, longitud equivalente. Los datos disponibles en la bibliografía, se recogen en las Figuras 2.14.8., 2.14.9. y 2.14.10.

La segunda forma, consiste en expresar la pérdida de carga de un punto singular en función de la presión dinámica del fluido que circula por el mismo, estableciendo unos coeficientes de proporcionalidad para cada tipo de elemento, según sea su forma y dimensiones. En las Figuras 2.14.11 a 2.14.22., se dan los valores del coeficiente de proporcionalidad n , para distintos puntos singulares.

14.4. PERFILES DE PRESION EN CONDUCTOS

Supongamos un ventilador acoplado a un conducto de modo que impulse aire hacia el interior del mismo, - adoptando la disposición que indicamos en la parte superior de la Figura 2.14.23. Si a lo largo de esta canalización efectuamos una serie de mediciones de las presiones estática, dinámica y total en la forma indicada en la Figura 2.14.3., y representamos gráficamente los valores obtenidos tomando como ordenadas - los valores de presiones y en abscisas la longitud de la canalización, obtendremos el resultado que se indica en la parte inferior de la Figura 2.14.23; en ella, se observa que la presión dinámica P_d se mantiene constante a lo largo del conducto como permite prever la ecuación de continuidad, pues al ser el conducto de - sección constante, la velocidad (y por tanto la presión dinámica) debe ser constante a lo largo del mismo.

La presión total, en cambio, va disminuyendo a lo largo del conducto debido a la pérdida de carga que se - produce en cada punto del mismo. Como consecuencia, la presión estática, diferencia entre la total y dinámica, disminuye también progresivamente a lo largo del conducto, hasta llegar a valer cero (la presión atmosférica) a la salida del conducto. Si repetimos el ensayo, pero colocando el ventilador de forma que succione del conducto en lugar de impulsar aire hacia el mismo, como antes (Figura 2.14.24.) y efectuamos de nuevo las medidas, observaremos que los valores de la presión dinámica son los mismos que anteriormente, pero, en cambio, los de las presiones total y estática han invertido su signo y, además, en valor absoluto la presión estática supera a la total.

Llevados los valores obtenidos sobre ejes coincidentes con la canalización, según lo indicado antes, obtenemos la gráfica de la Figura 2.14.24. El que las presiones estáticas resulten negativas en este caso se comprende por cuanto el ventilador trabaja succionando o sea, produciendo un vacío dentro de la canalización - que determina una presión interior por debajo de la atmosférica exterior.

Si, finalmente, disponemos un conducto a cada lado del ventilador de iguales dimensiones y características de los anteriores y hacemos nuevo ensayo, llevando los valores obtenidos a una gráfica, tendremos la Figura 2.14.25., en la que se observa que el comportamiento de las líneas es como en los casos anteriores uni

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2, / 220		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

dos, aunque los valores han cambiado presentándose una presión dinámica notablemente inferior y unas presiones estáticas superiores, como es lógico, al duplicar la longitud del conducto y aumentar por tanto las pérdidas de carga del mismo.

Si pasamos ahora de los casos simples presentados hasta aquí, y nos proponemos uno que puede muy bien ser real, como el de la Figura 2.14.26., en el que tenemos un ventilador aspirando por un conducto de dos tramos de secciones distintas e impulsando aire hacia una canalización en la que en uno de sus tramos hay un obstáculo (una viga, por ejemplo) y efectuamos mediciones de presión a lo largo de la conducción tal como venimos haciendo, encontraríamos una gráfica como la representada en la Figura 2.14.26. Obsérvese que cada vez que se produce un ensanchamiento en el conducto, la presión dinámica baja, como corresponde a la disminución de velocidad que experimenta el aire, mientras que la presión estática aumenta.

14.5. CURVA CARACTERISTICA DE UNA CONDUCCION

Se llama curva característica de una conducción o de un conjunto de ellas que desembocan a un único conducto general, a la gráfica que representa la variación de las pérdidas de carga que se producen al circular por ella el aire en función del caudal del mismo.

Su forma es la que se indica en la Figura 2.14.27; la forma de la curva, una parábola que pasa por el origen puede explicarse de forma sencilla en el caso de una única conducción, mediante el siguiente razonamiento: una conducción puede considerarse, como ya hemos visto como un conjunto de tramos rectos y puntos singulares en cada uno de los cuales se produce una pérdida de carga P_c que es proporcional a la presión dinámica, P_d , en él, es decir :

$$P_c = n P_d = n \frac{\rho v^2}{2} = n \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{S} \right)^2 = \frac{n}{2S^2} Q^2$$

donde Q , es el caudal de aire y S , la sección.

Resulta pues que : $P_c = K Q^2$

la pérdida de carga es proporcional al cuadrado del caudal, ecuación cuya representación gráfica es la dada en la Figura 2.14.27.

En el caso de conducciones con ramas laterales, el razonamiento es más complicado, pero se llegan a resultados equivalentes.

La curva característica de una conducción es una herramienta importante en el estudio del comportamiento de un sistema de extracción, especialmente en su dinámica, como veremos con más detalle al estudiar los ventiladores y el diseño de conducciones.

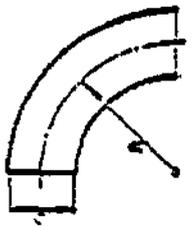
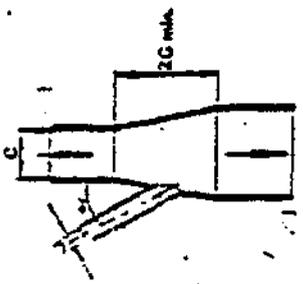
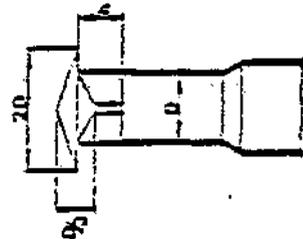
Elemento	Diámetro del conducto															
	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1.000	
	R-D	1.3	1.7	2.5	3.4	4.3	5.1	6	6.8	7.6	8.5	10	12	13.5	15	17
	R=1.5D	0.9	1.2	1.8	2.4	3	3.6	4.2	4.8	5.4	6	7.2	8.4	9.6	11	12
	R=2D	0.7	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	7	8	9	10
	30°	0.6	0.8	1.5	2.2	2.8	3.4	4.1	4.7	5.4	6	8.4	9.4			
	45°	0.8	1.5	2.3	3.4	4.4	5.4	6.4	7.4	8.4	9.4					
	h=d	0.02	0.9	1.2	1.6	2.1	2.7	3.3	3.9	4.6	5.4	6.3	7.3	8.4	9.6	11.7
	h=0.75d	0.9	1.6	2.1	2.7	3.3	3.9	4.6	5.4	6.4	7.1	8.7	9.9	11.7		
	h=0.5d	3.6	6	7.8	10.9	13.2	15.9	18.6	21.3	24.2	28.6	35.3	40.2	47.6		

Figura - 2.14.B. - Pérdida de carga de algunos puntos singulares en metros de tubería recta equivalente.

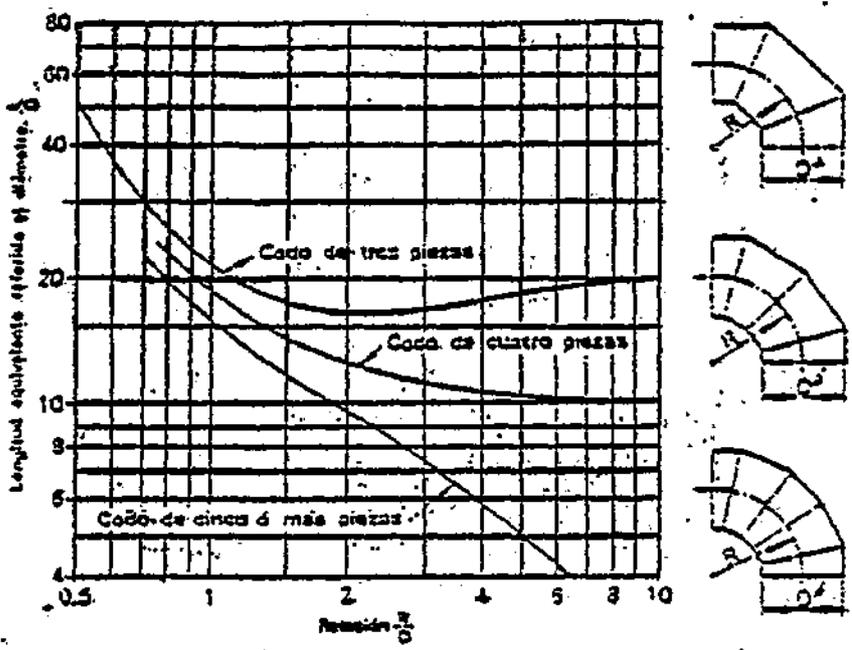


Figura. - 2.14.9: - Longitud equivalente de codos de sección circular.

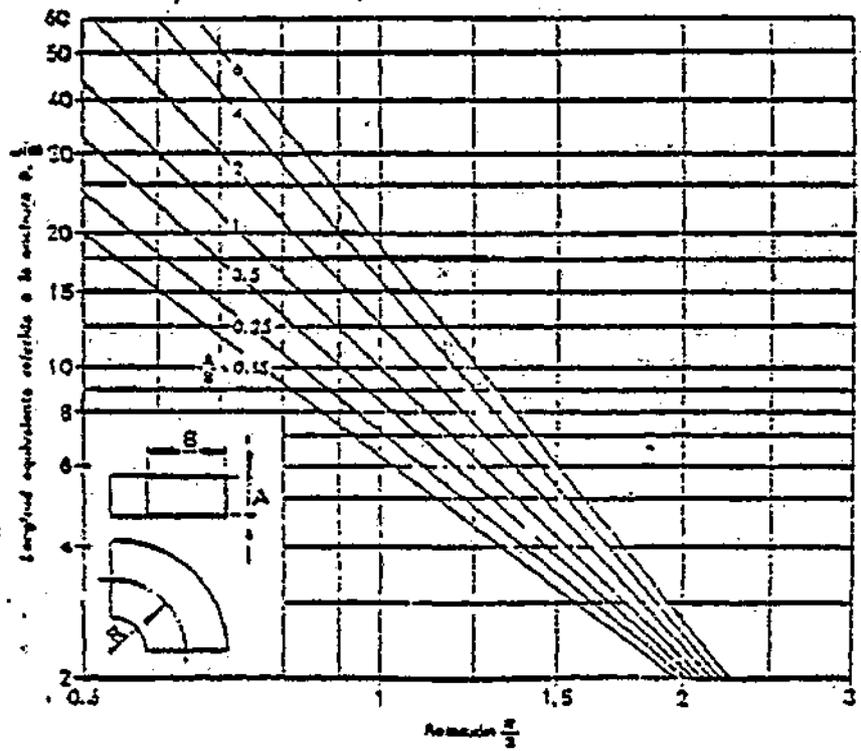
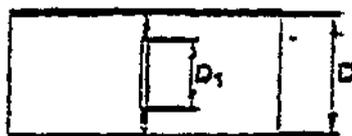
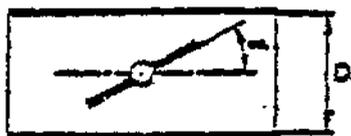


Figura. - 2.14.10. - Longitud equivalente de codos de sección rectangular.

Coefficientes n de pérdida de carga referidos a la velocidad del aire en D



DIAFRAGMAS



REGISTROS

D_1/D	0.2	0.4	0.6	0.8
n	2.5	2.2	1.5	0.5

α	5°	10°	20°	30°	35°
n	0.25	0.5	1.5	3.9	5.5

Figura. - 2.14.11. - Pérdida de carga en diafragmas y registros.

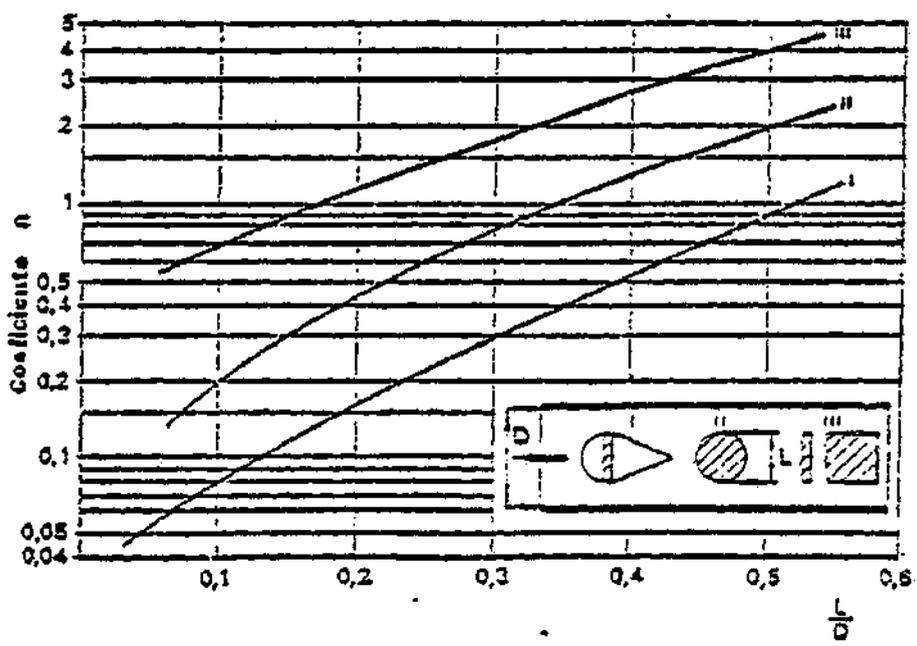


Figura. - 2.14.12. - Pérdida de carga producida por cuerpos atravesados en el conducto.

Coefficientes n de pérdida de carga referidos a la velocidad frontal media:

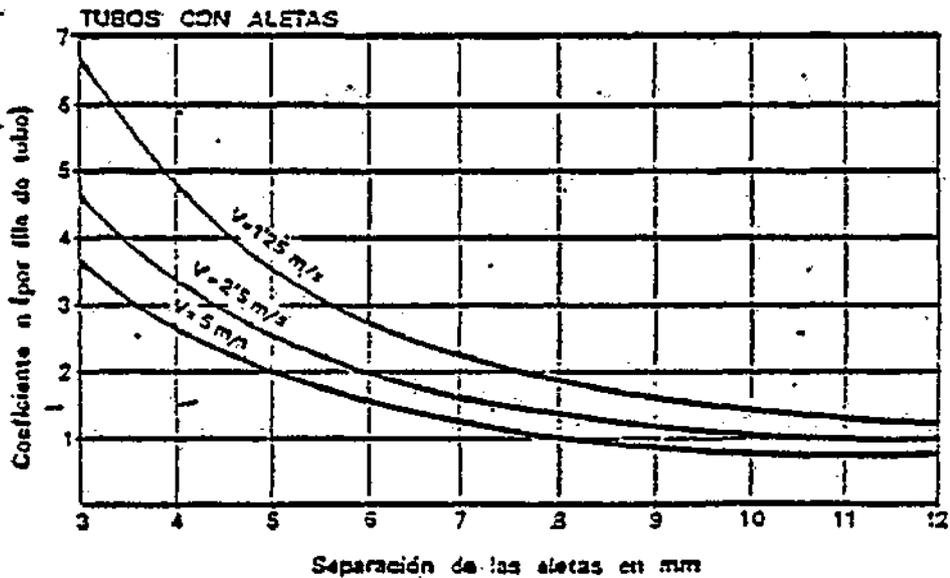
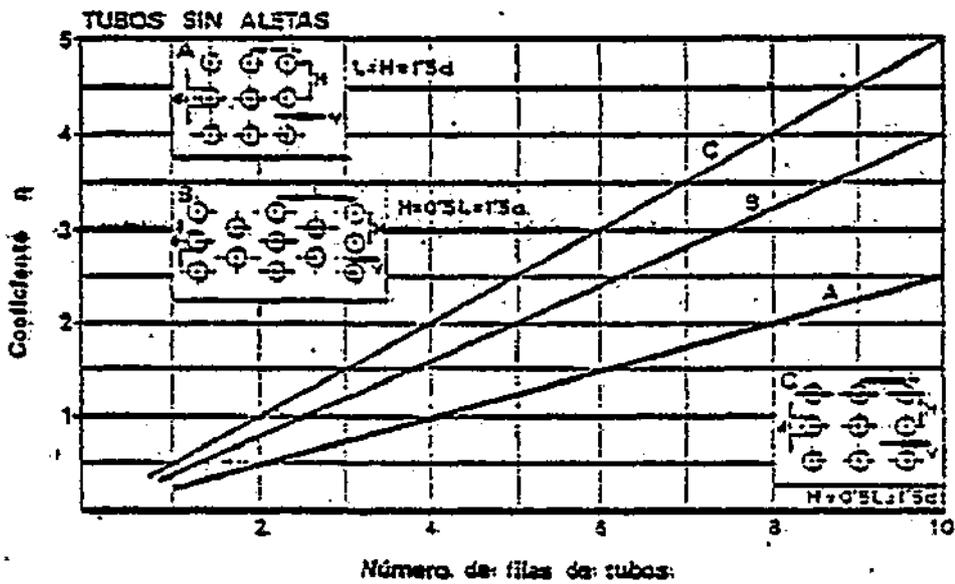
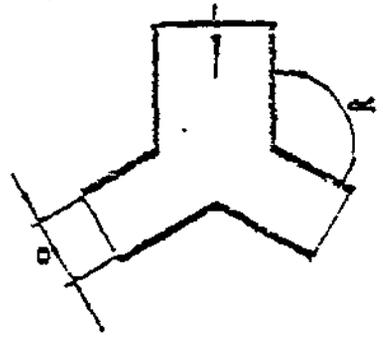
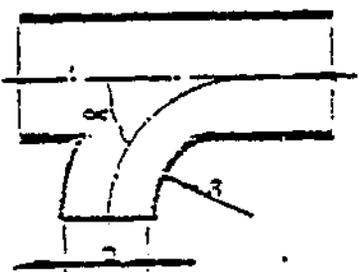


Figura. - 2.14.13. - Pérdida de carga producida por haces de tubo.

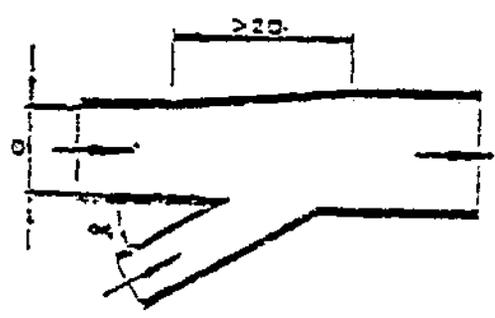
Coefficientes n de pérdida de carga referidos a la velocidad del aire en D



	α	30°	100°	120°	140°	180°
Rectangular	$n =$	1.5	1.3	1	0.5	0.15
Circular	$n =$	1	0.8	0.7	0.25	0.09



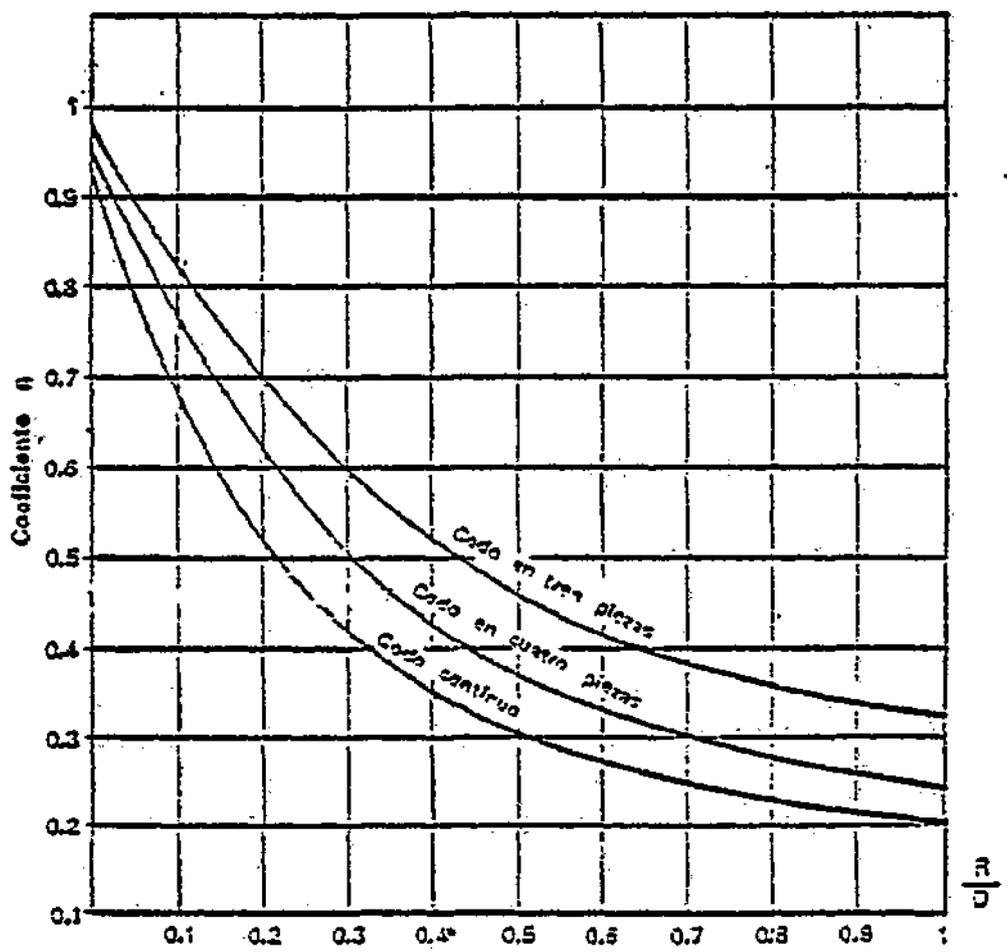
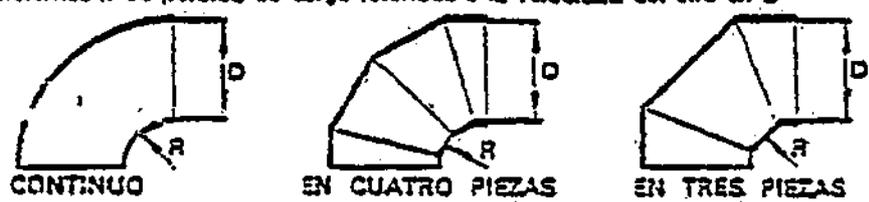
	R/D	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$\alpha = 90^\circ$	$n =$	1	0.5	0.35	0.25	0.22	0.2
$\alpha = 45^\circ$	$n =$	0.5	0.4	0.25	0.13	0.16	0.15



Ángulo α	Coefficiente n
10°	0.06
15°	0.09
20°	0.12
25°	0.15
30°	0.13
35°	0.21
40°	0.25
45°	0.33
50°	0.32
60°	0.44
90°	1

Figura - 2.14.14. - Pérdida de carga producida en uniones de conductos.

Coefficientes n de pérdida de carga referidos a la velocidad del aire en D



Factores correctivos para multiplicar los coeficientes del gráfico anterior para el caso de ángulos diferentes de 90°

Ángulo	0	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°
Factor correctivo	0	0,20	0,38	0,50	0,62	0,73	0,81	0,89	0,95	1	1,04	1,09	1,12

Figura. - 2.14.15.- Pérdida de carga producida en codos de sección circular.

Coefficientes n de pérdidas de carga referidos a la velocidad de aire D

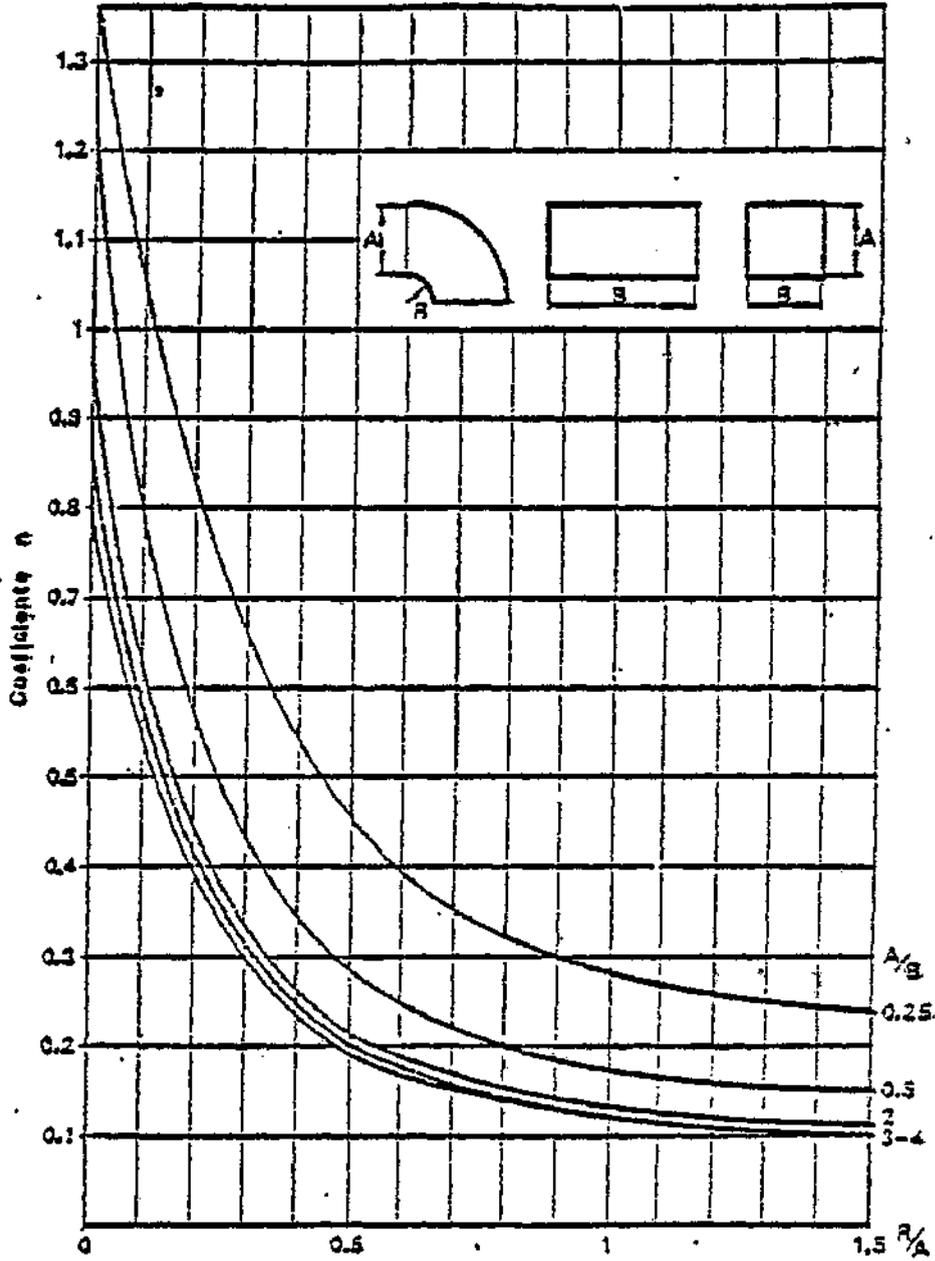


Figura. - 2.14. 16. - Pérdida de carga producida en codos en ángulo recto de sección rectangular.

Coefficientes n de pérdida de carga referidos a la velocidad del aire en D

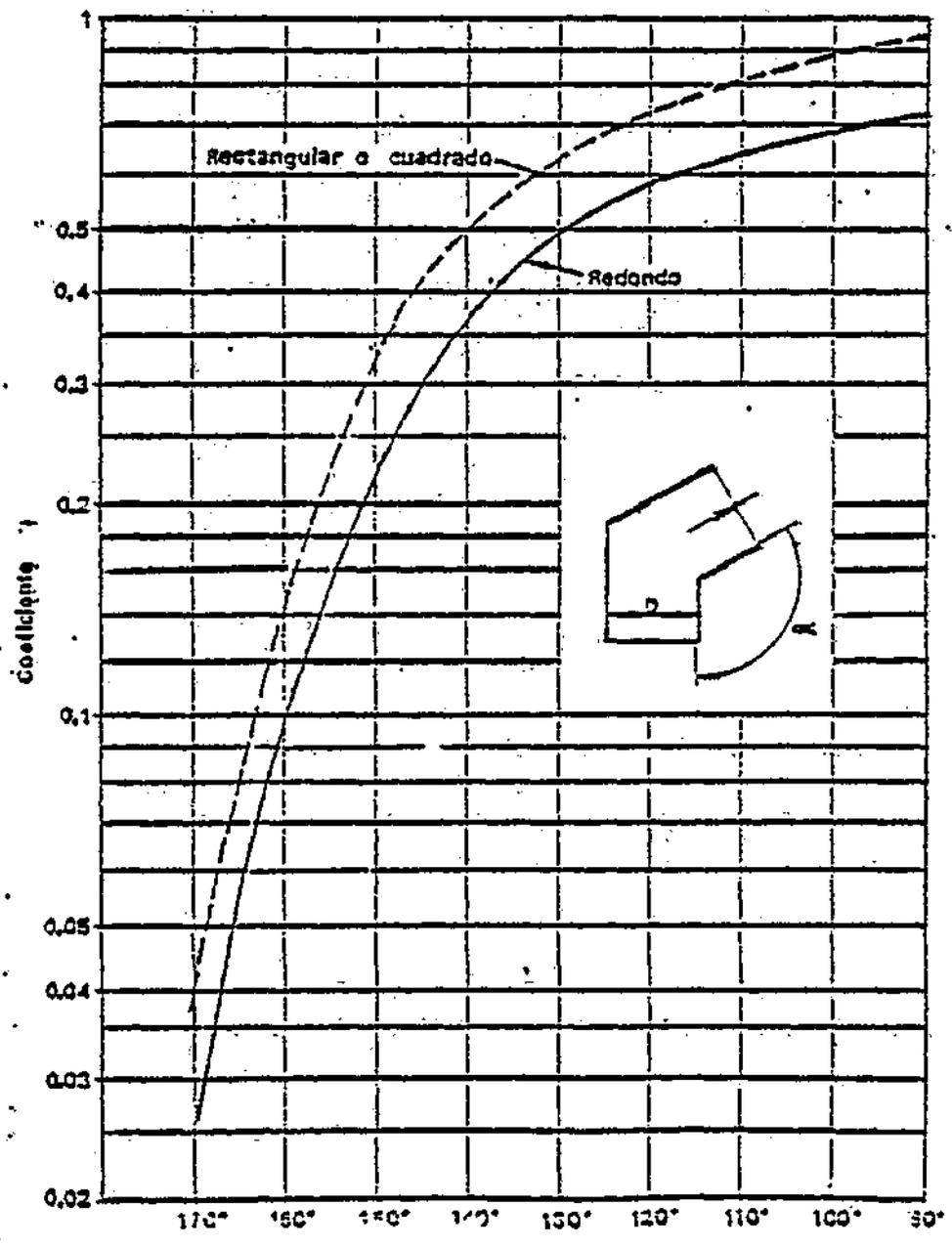


Figura. - 2.14.17. - Pérdida de carga producida en codos en ángulo ocuso.

Coefficientes n de pérdida de carga relacionados a la velocidad del aire en D

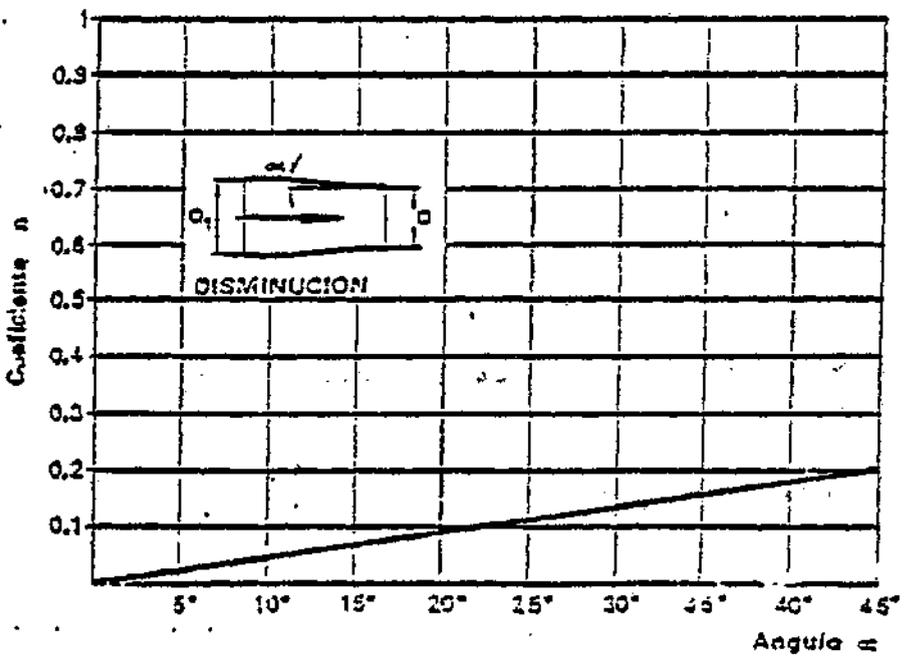
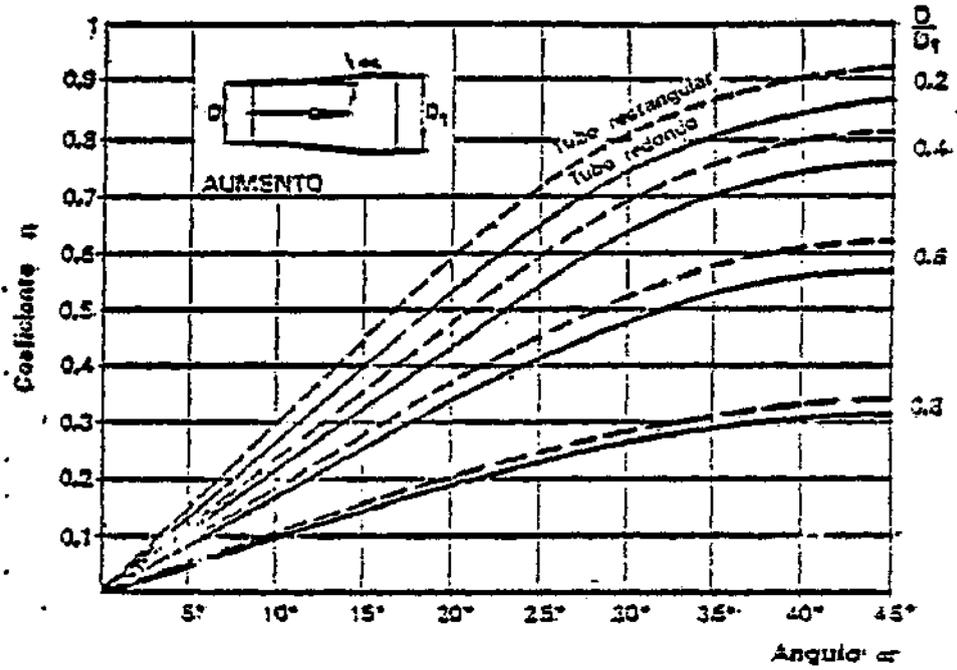


Figura. - 2.14.18. - Pérdida de carga producida en cambios graduales de sección.

Coefficientes n de pérdida de carga referidos a la velocidad del aire en D

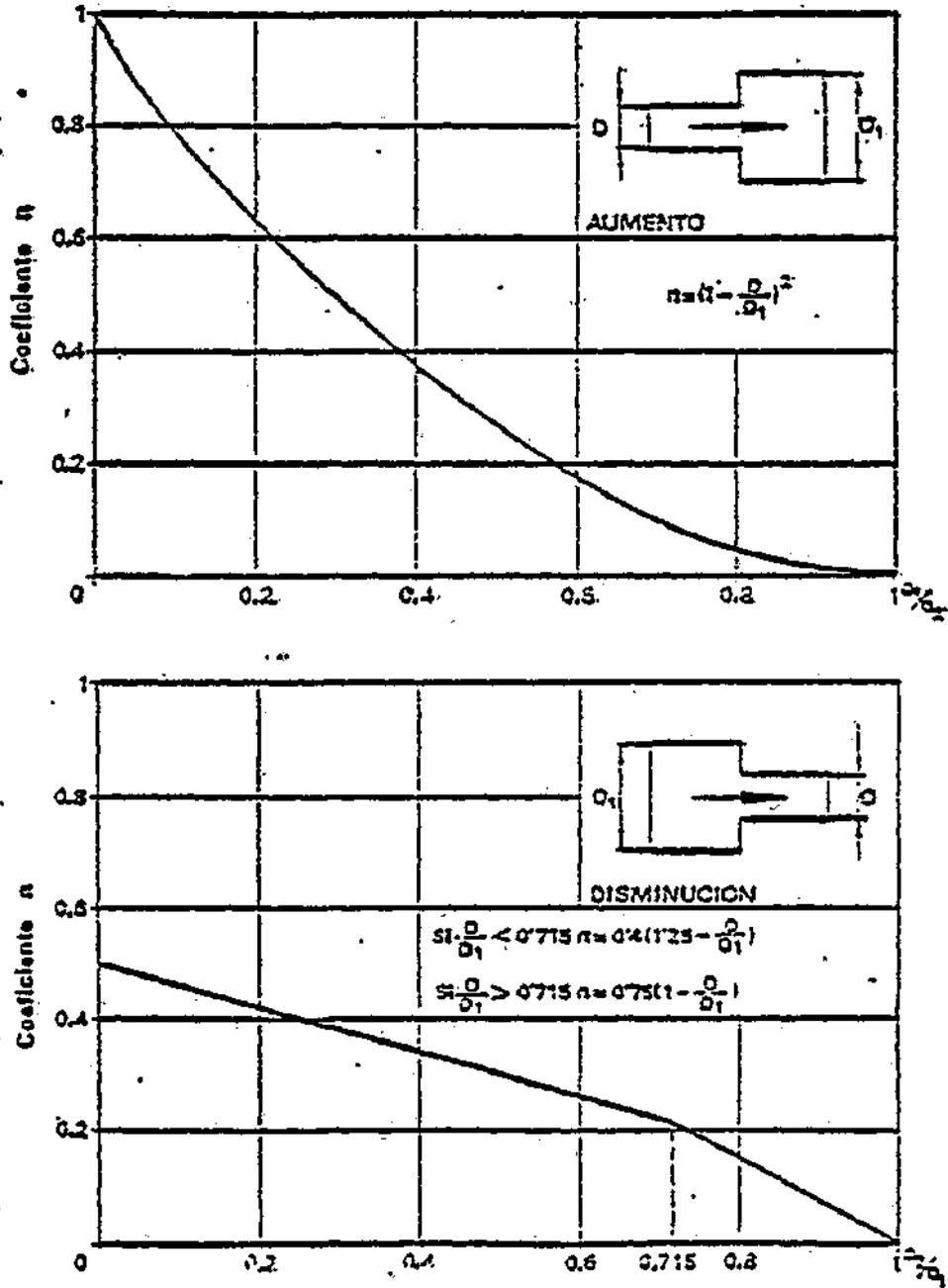
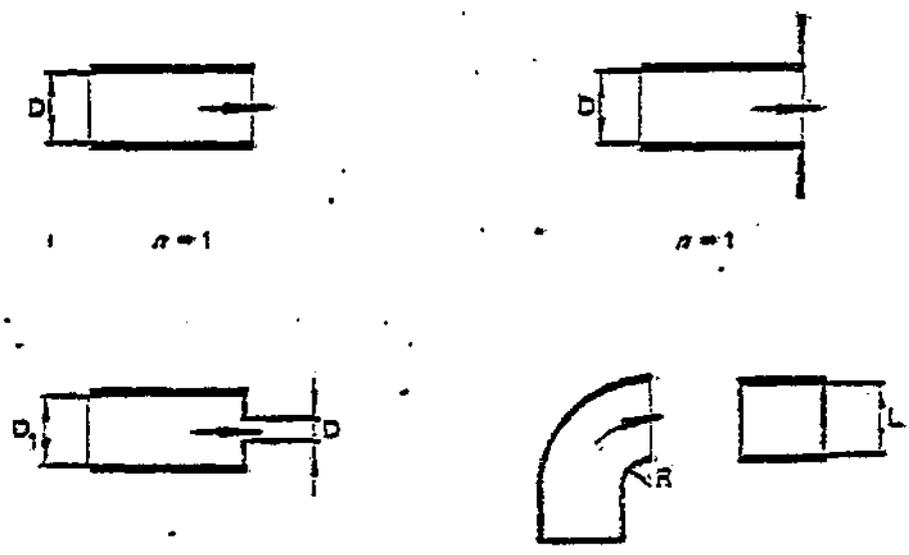


Figura. - 2.14.19. - Pérdida de carga producida en camos bruscos de sección.

Coefficientes n de pérdida de carga referidos a la velocidad del aire D



D/D_1	0.25	0.5	0.75	1	R/L	0	0.25	0.5	0.75	1
n	2.5	1.9	1.5	1	n	3	1.9	1.6	1.5	1.4

Figura. - 3.14.20. - Pérdida de carga producida en salidas de conductos.

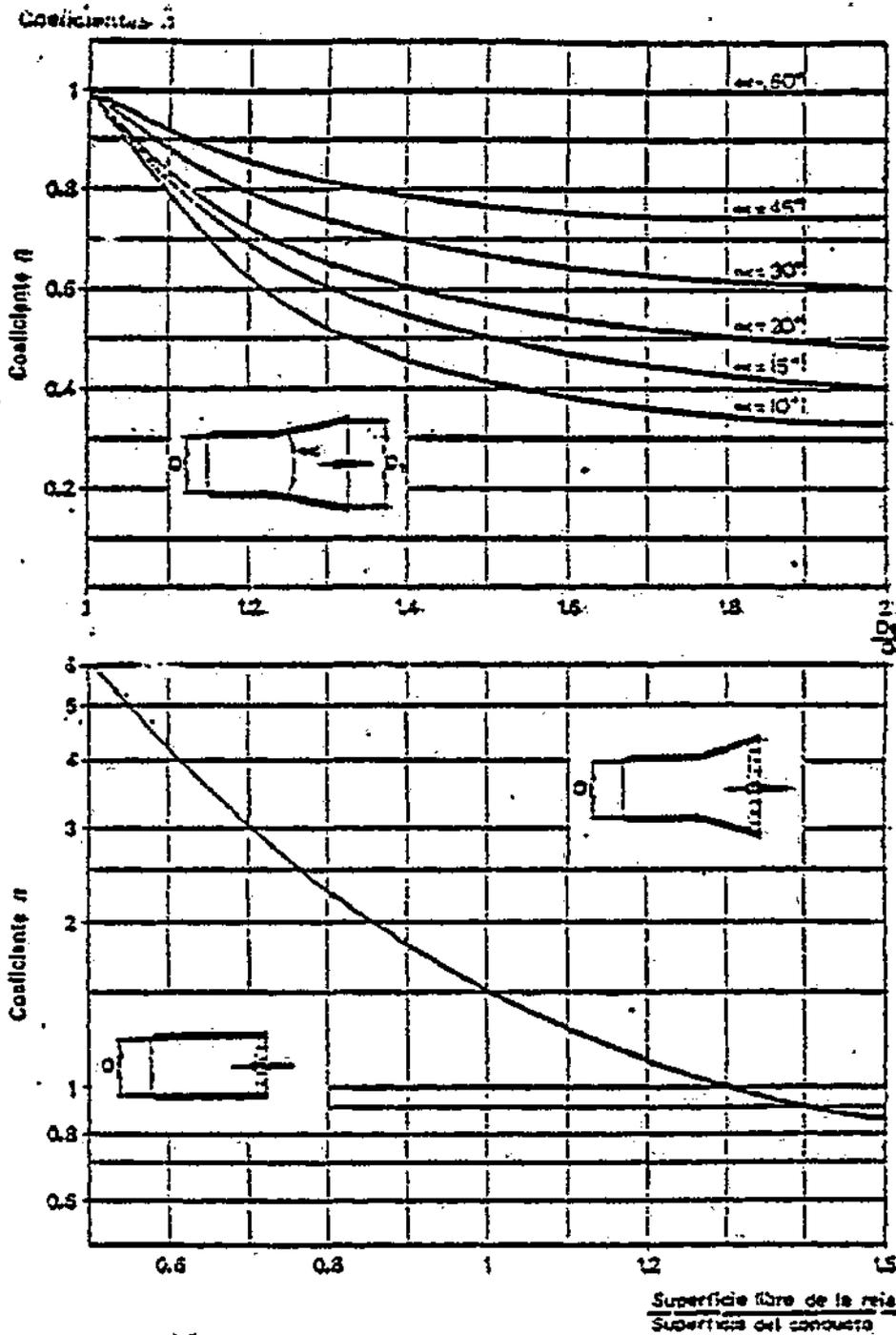


Figura. - 2.14.21. - Pérdida de carga producida en salidas de conductos.

Coefficientes n de pérdida de carga referidos a la velocidad del aire en D

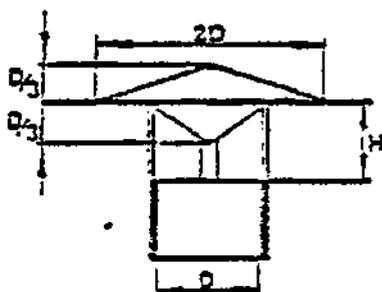
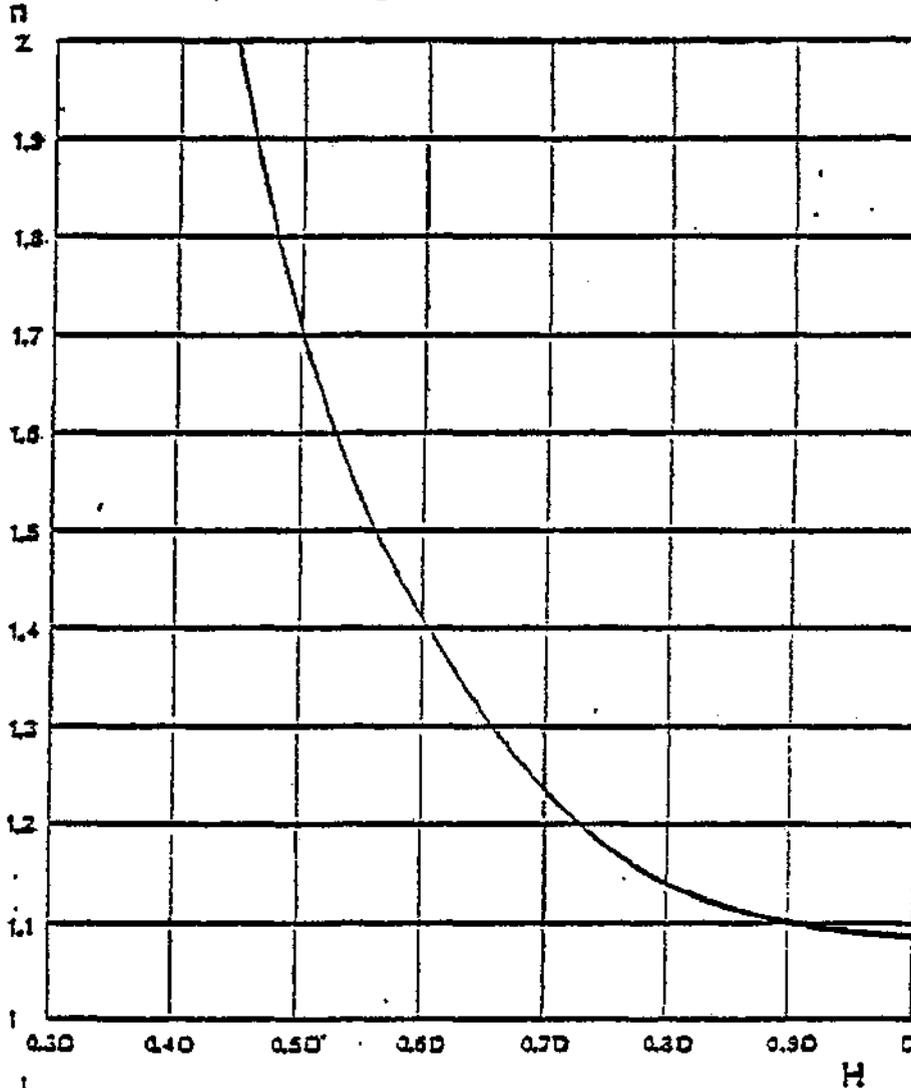


Figura. - 3.14.32. - Pérdida de carga producida en salidas con sombrero.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2; / 2.3.4.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	14	CAPITULO: DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

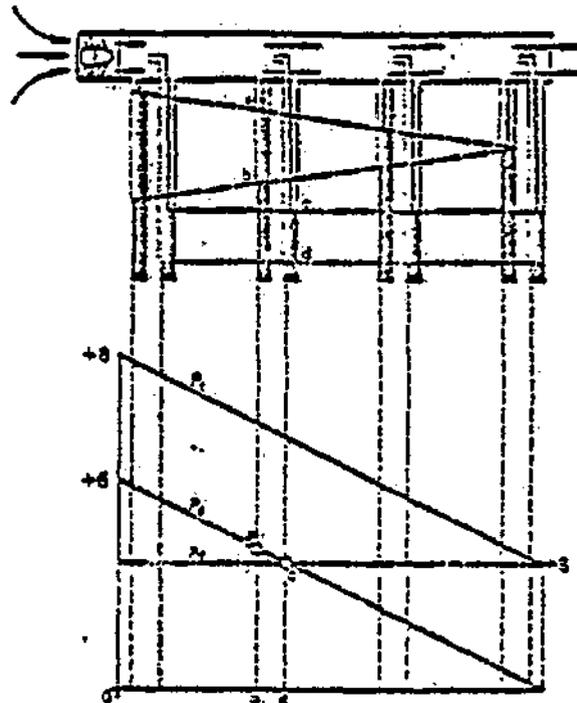


Figura. - 2.14.23. - Perfiles de presión en una tubería simple (ventilador impulsando).

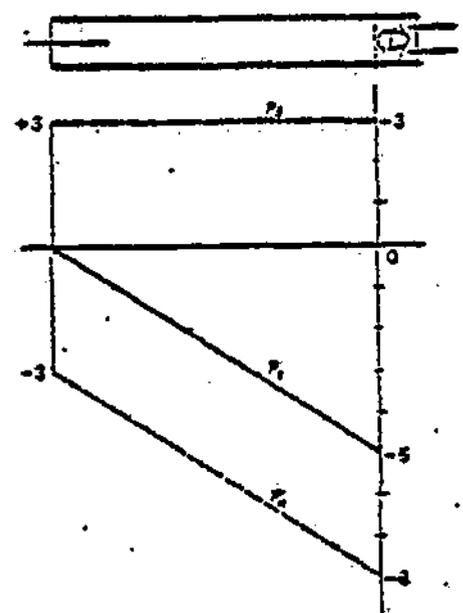


Figura. - 2.14.24. - Perfiles de presión en una tubería simple (ventilador extrañendo).

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./235		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	14	CAPITULO: DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

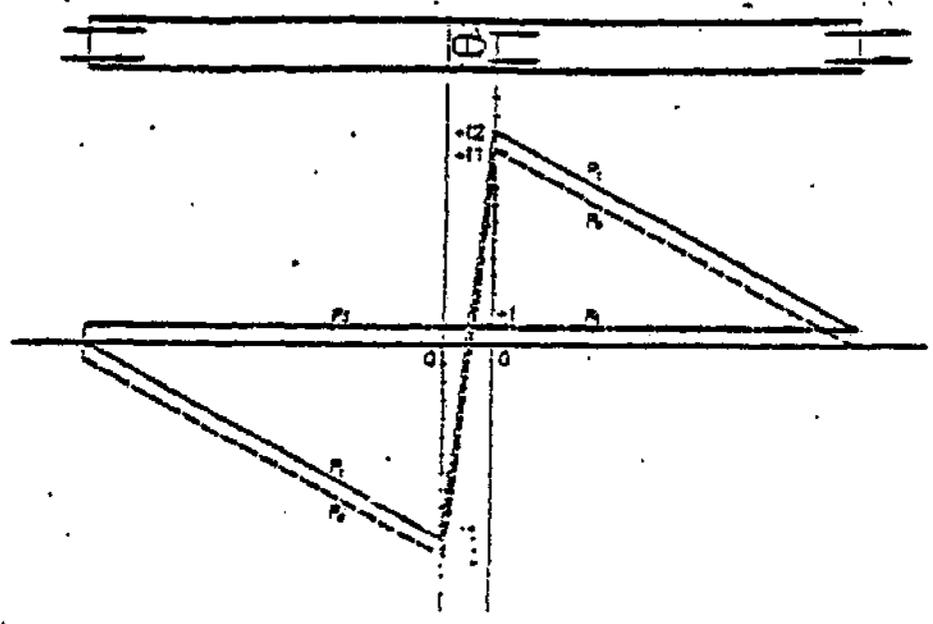


Figura. - 2.14.25. - Perfiles de presión en una tubería simple (ventilador en el centro).

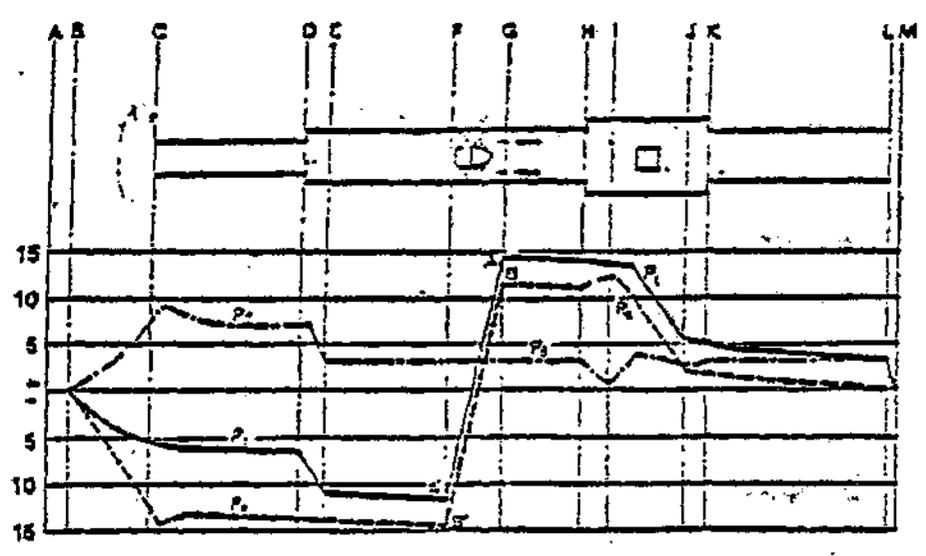


Figura. - 2.14.26. - Perfiles de presión en una tubería con puntos singulares.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2. / 235		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

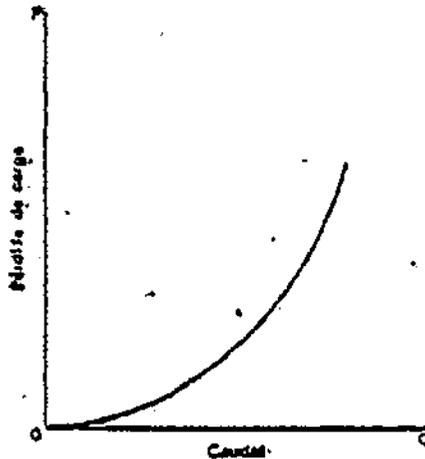


Figura. - 2.14.27. - Curva característica de un sistema.

14.6. EJEMPLO DE CALCULO DE REDES DE ASPIRACION

Un sistema de extracción localizada, consta de elementos de captación, depuradores del aire captado, ventiladores y un conjunto de conducciones de aire que unen estos elementos.

En el caso más simple, el sistema sólo tendrá el elemento de captación, un ventilador y un conducto de unión, pero en muchos casos, el sistema se compondrá de varios puntos de captación con un sólo ventilador y una red de conducciones formada por un conducto principal y unas ramificaciones laterales para unir cada elemento de captación al conducto principal.

El diseño de conducciones tiene como finalidad dimensionar las conducciones de un sistema de extracción localizada, de forma que los caudales de aire que se aspirarán en cada punto de captación, sean los fijados previamente por el diseño de los elementos de captación.

Una vez dimensionadas las conducciones es posible determinar las características que debe tener el ventilador y la velocidad y presión en cualquier punto del sistema, datos que son muy importantes para efectuar revisiones periódicas del sistema de extracción.

Antes de empezar con el dimensionado de las conducciones, se deben concretar los datos siguientes :

- Situación en la fábrica de las campanas que componen el sistema de extracción.
- Tipo de las campanas y caudal necesario en cada una de ellas.
- Situación de los depuradores y del ventilador.
- Geometría de las conducciones (Codos, uniones, tramos rectos, etc.).

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 297		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

- Restricción del diseño (velocidades mínimas, diámetros máximos, etc.).

Es conveniente identificar cada elemento de captación, unión de conductos u otros puntos singulares, mediante letras o números a fin de facilitar unos cálculos sistemáticos.

14.6.1. Métodos de cálculo

- Fundamento físico

El flujo de aire en un sistema de extracción, por complicado que sea, cumple las dos ecuaciones básicas ya mencionadas de continuidad y de conservación de la energía o teorema de Bernoulli. En un sistema de extracción localizada, los caudales en cada rama serán tales que las pérdidas de carga que ocurran al circular el aire entre dos puntos por caminos distintos, sean las mismas. En el diseño de conducciones, el dato es el caudal que debe circular en cada rama y, por tanto, se deben dimensionar las conducciones de forma que las pérdidas de carga sean iguales.

- Método aproximado de diseño

Este método, llamado por algunos autores "Método Dinámico", se basa en elegir arbitrariamente la velocidad del aire en cada rama de la instalación, lo que junto con el caudal, permite el cálculo del diámetro.

Los caudales de aspiración que realmente circularán en una instalación calculada por este método, serán tanto más cercanos a los deseados, cuanto mayor sea la habilidad del diseñador al elegir las velocidades. Por lo tanto, no es un método aconsejable para realizar un diseño definitivo, pero es útil para un diseño previo y tener una idea sobre el tamaño de la instalación.

- Método de equilibrado dinámico

Se basa en calcular la pérdida de carga existente en cada circuito lateral de la instalación, empezando por la rama de mayor resistencia y avanzando hacia el ventilador. En cada unión de dos ramas, se comprueba que las pérdidas de carga sean iguales y, en caso contrario, se modifica el diámetro o la velocidad de una rama lateral a fin de igualar las pérdidas de carga. Al elegir un nuevo valor, debe tenerse en cuenta que, a caudal constante, la pérdida de carga es inversamente proporcional a la quinta potencia del diámetro o directamente proporcional a la potencia 2,5 de la velocidad.

La pérdida de carga en cada rama del sistema, se puede calcular siguiendo cualquiera de los métodos expuestos en un punto anterior.

Otra versión de este método se basa en calcular la presión estática en vez de la pérdida de carga.

La utilización de esta versión, tiene la ventaja de que las presiones medidas en el sistema con un manómetro, pueden ser comparadas directamente con los valores calculados al realizar el diseño del sistema.

El incremento de presión estática, en valor absoluto, entre dos puntos de un sistema de extracción, es igual a la suma de la pérdida de carga que ocurre entre ellos, y el incremento de presión de velocidad.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 238		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

Cada vez que en una conducción se produzca una variación de velocidad, es necesario corregir el valor de la presión estática, aumentándolo si hay aceleración o disminuyéndolo si ocurre una deceleración.

En las uniones de dos conductos, la corrección se efectúa sobre la presión de velocidad media que se calcula con la ecuación :

$$PV_m = \left[\frac{Q_1 + Q_2}{4.043 (A_1 + A_2)} \right]^2$$

siendo Q_1 y Q_2 , los caudales de cada conducto en m^3/s y A_1 y A_2 , las secciones en m^2 . PV_m es la presión de velocidad media. Si la presión de velocidad real del conducto que recoge a los anteriores, es distinta a la media, la presión estática debe corregirse tal como se ha indicado. Como norma general, esta corrección debe hacerse cuando la presión de velocidad del conducto general difiere en más de 2 mm. cda. de alguna de las presiones de velocidad de los conductos que se unen en él.

- Equilibrado mediante registros

En esencia, es igual al método anterior, pero cuando se encuentra una unión no equilibrada no se corrigen las velocidades hasta encontrar el equilibrio, sino que se sitúa en la rama de menor resistencia un registro o compuerta que aumenta la resistencia de dicha rama hasta equilibrar la unión. Lógicamente en el diseño únicamente se decide sobre la situación de los registros realizándose el ajuste sobre el propio sistema una vez construido.

- Comparación de ambos métodos

El método de equilibrado dinámico se utilizará normalmente en los casos en que se manipulen materiales muy tóxicos, evitando el peligro de una posible fuga o mal funcionamiento por manipulación indebida en los registros. En caso de manipulación de polvos explosivos o radioactivos, el uso de este método es casi obligado a fin de eliminar la posibilidad de acumulación de polvo en los registros.

En los demás casos, el uso de equilibrado mediante registros es más conveniente, ya que, además de su mayor simplicidad de cálculo es un sistema más flexible y permite modificar o ampliar el sistema de extracción localizada sin necesidad de rediseñar todo el sistema.

14.6.2. Ejemplo numérico

Como ejemplo de diseño de un sistema de extracción localizada, se expone a continuación el desarrollo de un caso. El cálculo se ha basado en la comparación de presiones estáticas, obtenidas como suma de la pérdida de carga y el incremento de la presión dinámica. Para calcular la pérdida de carga se ha utilizado el método de la longitud equivalente.

En la Figura 2.14.28., se ha representado el esquema de la instalación, y en las Tablas 2.14.1. y 2.14.2, se representan la lista de elementos y la geometría propuesta para el sistema.

A continuación, se encuentra la hoja de cálculos, en la que quedan reflejadas las dimensiones de cada conducto y las características del ventilador necesario para mover el aire en este sistema. Obsérvese que las presiones estáticas indicadas son valores absolutos. La presión estática es negativa (inferior a la atmosférica).

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA, 2, 2, / 239		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

rica) en todo el sistema antes del ventilador, y positiva después del mismo.

Como criterio para decidir sobre el equilibrio de dos ramas en el punto de unión de las mismas, se ha seguido el siguiente. Cuando la diferencia de presiones estáticas es inferior al 5%, se considera como equilibrado. Si la diferencia es superior al 20%, se corrige la geometría de la rama cuya presión estática es inferior. Si queda entre el 5% y 20%, no se recalcula la geometría, sino que se estima el incremento de caudal que ocurrirá en la rama de menor resistencia mediante la fórmula :

$$Q = Q_0 \sqrt{\frac{PE}{PE_0}}$$

siendo Q el caudal corregido, Q_0 el caudal anterior, PE_0 la presión estática anterior, y PE la nueva presión estática.

TABLA 2.14.1

Elementos del sistema de extracción localizada

Nº	Elemento	Caudal (m ³ /s)
1	Mesa para desbarbado (1,2 x 1 m)	1,2
2	Cabina de granallado (3 x 3 x 2 m)	4,0
3	Mesa de limpieza (1,2 x 1,2 m. de abertura)	1,1
4	Muela vertical (Diámetro 600 mm)	0,57
5	Muela vertical (Diámetro 800 mm)	0,57
6	Filtro mangas (pérdida de carga 50 mm cda)	
7	Ventilador	

TABLA 2.14.2

Geometría del sistema

Conducto nº	Caudal	Longitud	Codos	Uniones
1a - A	0,60	1,0	1 - 90º	1 - 30º
1b - A	0,60	1,0	1 - 90º	1 - 30º
A - B	1,20	4,0	1 - 90º	1 - 30º
B - C	1,20	1,5		
2a - C	2,00	2,0	1 - 90º	1 - 45º
C - D	3,20	2,0		
2b - D	2,00	2,0	1 - 90º	1 - 45º
D - E	5,20	1,5		
3 - E	1,10	3,0	1 - 90º	1 - 45º
E - G	6,30	1,5		
4 - F	0,57	1,6	1 - 90º	1 - 45º
5 - F	0,57	1,6	1 - 90º	1 - 45º
F - G	1,14	3,5	1 - 90º	1 - 45º
G - H	7,44	2,0	2 - 90º	
I - J	7,44	1,0		

TABLA 2.14.3.

Capítulo	Diam. (m)	Secc. (m ²)	Caudal (m ³ /s)	Veloc. (m/s)	Codos	Uniones	LE	Recto	Total	par m.	Total	P.V. mmeda	Coef. (PV)	% para (PV)	Total	Acel. mmeda	P.E. (mmeda)	Cont. (mmeda)
1a-A	0,2	0,0314	0,6	19,1	90º	30º	4,2	1,0	5,2	2,2	11,4	22,8	0,5	1,5	34,2		45,6	
1b-A	0,2	0,0314	0,6	19,1	90º	30º	4,2	1,0	5,2	2,2	11,4	22,8	0,5	1,5	34,2		45,6	
A-B	0,28	0,0616	1,2	19,5	90º	30º	6,0	4,0	10,0	1,5	15,0	23,7	1,0	2,0	40,2		62,9	0,2
B-C	0,20	0,0616	1,2	19,5	90º	30º	1,5	1,5	2,3	1,5	2,3	23,7			48,2		62,9	0,2
2a-C	0,36	0,102	2,0	19,6	90º	45º	10,2	2,0	12,2	1,2	14,6	24,1	1,0	2,0	40,2		62,9	0,2
C-D	0,46	0,164	3,2	19,3	90º	45º	2,0	2,0	4,0	0,0	4,0	23,2			28,9		44,7	0,2
2b-D	0,36	0,102	2,0	19,6	90º	45º	10,2	2,0	12,2	1,2	14,6	24,1	1,0	2,0	40,2		62,9	0,2
D-E	0,50	0,264	5,2	19,7	90º	45º	7,5	3,0	10,5	1,5	15,0	23,1	0,25	1,25	28,9		44,7	0,2
3-E	0,27	0,0572	1,1	19,2	90º	45º	6,9	3,0	9,9	2,4	23,8	31,4	0,25	1,25	39,3		63,1	0,2
E-F	0,63	0,312	6,3	20,2	90º	45º	1,5	1,5	3,0	0,6	3,6	25,5	Incremento	25,5	25,3	0,2	59,5	0,2
F-G	0,19	0,0204	0,57	20,1	90º	45º	5,1	1,6	6,7	2,6	17,4	25,3	0,4	1,4	35,4		52,0	0,2
G-H	0,19	0,0204	0,57	20,1	90º	45º	5,1	1,6	6,7	2,6	17,4	25,3	0,4	1,4	35,4		52,0	0,2
H-I	0,27	0,0572	1,14	19,9	90º	45º	7,5	3,5	11,0	1,6	17,6	24,8	Incremento	24,8	24,8	0,2	70,4	0,2
I-J	0,69	0,774	7,62	20,4	90º	45º	13,8	2,0	15,8	0,5	7,9	25,9			78,3		78,3	0,2
J-K	0,70	0,905	7,62	19,8	90º	45º	1,0	1,0	2,0	0,5	0,5	24,5			25,3		59,5	0,2
K-L	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
L-M	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
M-N	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
N-O	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
O-P	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
P-Q	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
Q-R	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
R-S	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
S-T	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
T-U	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
U-V	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
V-W	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
W-X	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
X-Y	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
Y-Z	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2
Z-AA	0,63	0,312	7,62	24,4	90º	45º	4,0	4,0	8,0	3,2	11,2	37,3			48,2		62,9	0,2

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,3,4,1		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
MINER	14	CAPITULO : DISEÑO DE CAMPANAS Y REDES DE ASPIRACION	01	10	80

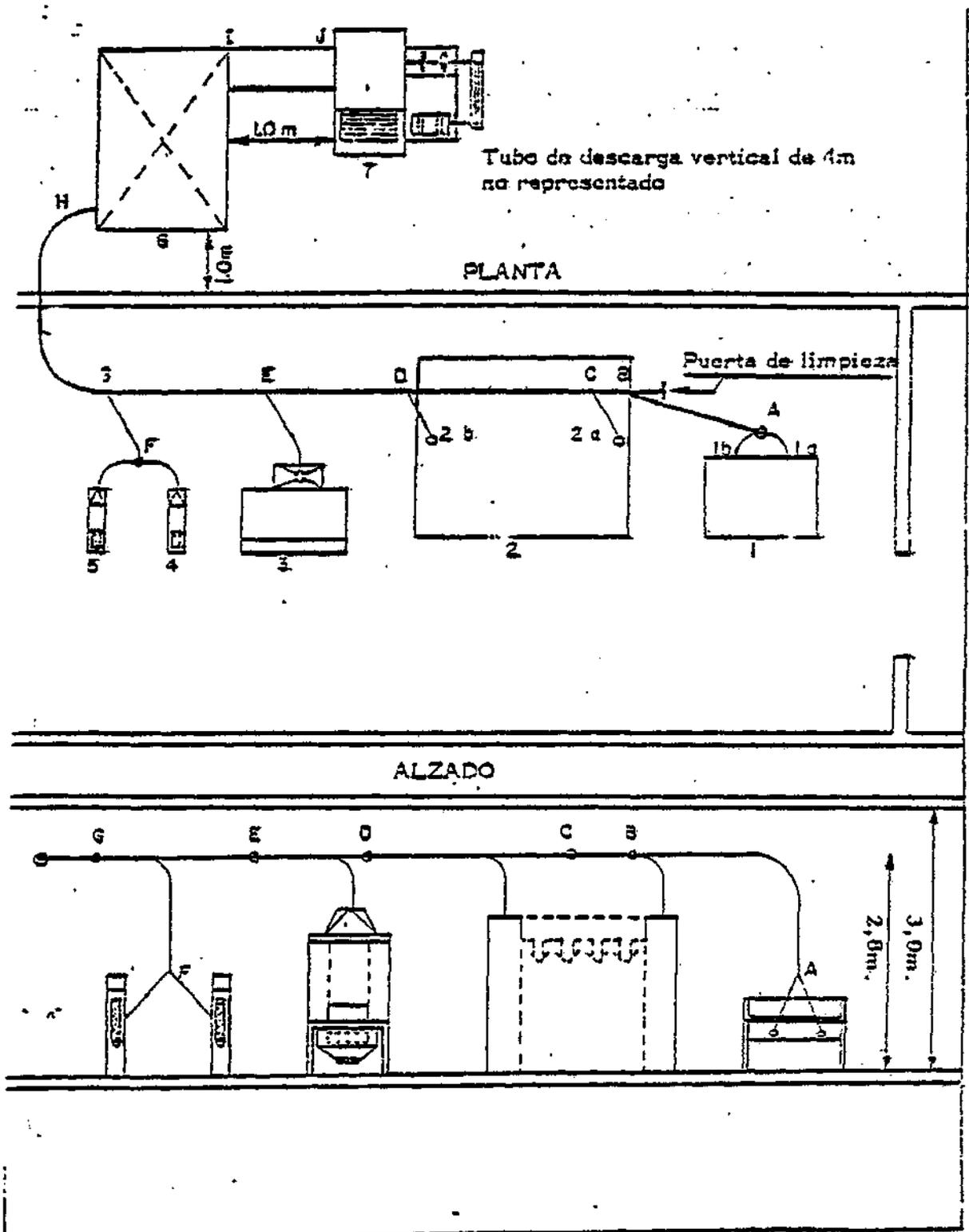


Figura. - 2.14.28. - Esquema de la instalación.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2 / 242		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80

15.1. INTRODUCCION

Un ventilador es una máquina estática que comunica energía a un gas, aumentando su presión y/o modificando su estado de movimiento, siendo la sobrepresión alcanzada por el gas inferior a 1000 mm cda. Si la sobrepresión es mayor, la máquina se llama Soplante o Turbo compresor.

En un sistema de extracción localizada, el ventilador es el elemento encargado de comunicar al aire la energía necesaria para arrastrarlo hasta el punto de captación y hacerlo circular por el conducto y elementos de limpieza, antes de devolverlo de nuevo a la atmósfera.

Actualmente, existen en el mercado una gran cantidad de modelos de ventiladores; el problema es, por tanto, la elección del que mejor se adapte a las necesidades de un sistema de extracción determinado.

15.2. CLASIFICACION DE LOS VENTILADORES

Los ventiladores se pueden agrupar en dos grandes familias, atendiendo a la trayectoria que sigue el fluido al pasar por ellos :

- Ventiladores Centrifugos
- Ventiladores Helicoidales, o de Flujo Axial.

A pesar de que ambos tipos coinciden en la definición dada en el párrafo anterior, en realidad, son máquinas bastante diferentes y no es posible una comparación sistemática entre ellas. Cada tipo tiene sus características propias que estudiaremos en este apartado y en el siguiente.

15.2.1. Ventiladores centrifugos

Este tipo de ventilador debe su nombre a la forma en la cual comunica la energía al gas.

El gas entra en el ventilador a través de una abertura concéntrica con el eje de una pieza que gira a gran velocidad, llamada rodete (Figura 2.15.1.). El rodete está provisto de álabes radiales solidarios con el mismo. El gas circula entre los álabes hacia el exterior a causa de la fuerza centrífuga, y abandona el rodete con una velocidad mayor que a la entrada. La salida de gas se recoge en una carcasa en espiral, llamada voluta, y sale del ventilador a través de una conducción tangencial a la voluta.

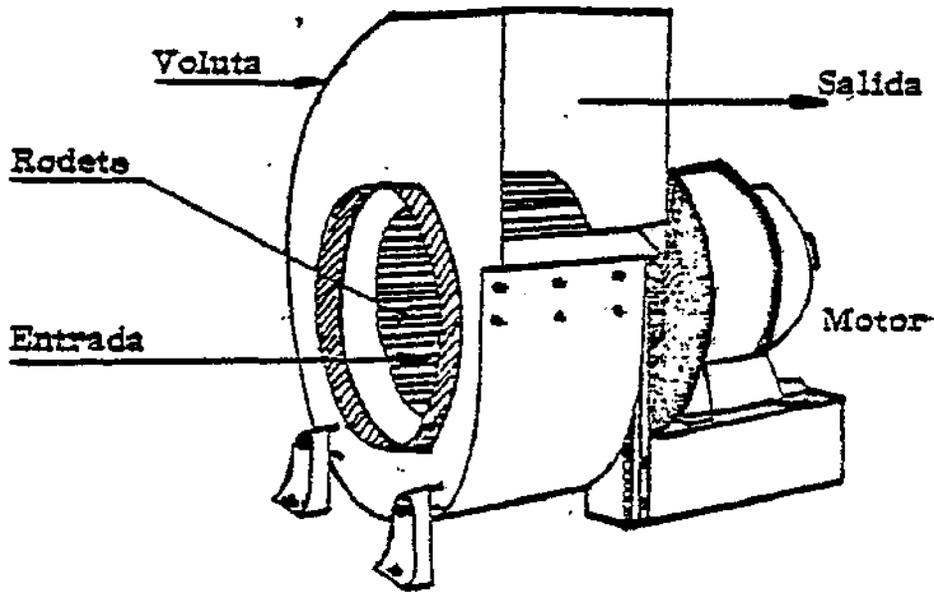
Toda la energía recibida por el gas procede del rodete que, a su vez, la recibe mediante el par de un eje giratorio arrastrado por un motor.

En un ventilador centrifugo las conducciones de entrada y salida forman un ángulo de 90º y el aire siempre entra y sale por los mismos conductos, aunque se invierta el sentido de giro del rodete.

En la Figura 2.15.1., se han representado un ventilador centrifugo y algunos tipos de rodete.

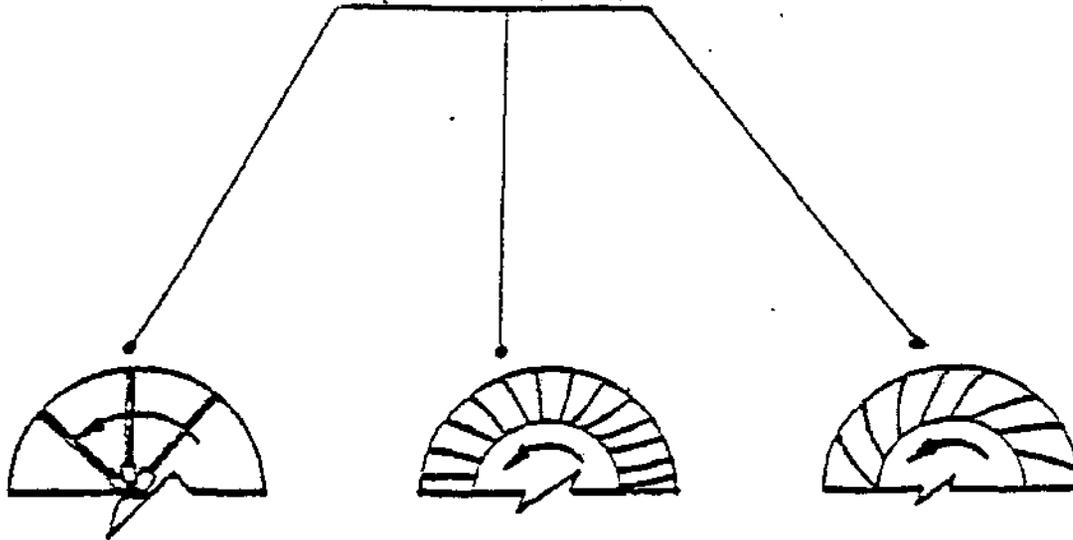
En general, el rendimiento mecánico de un ventilador centrifugo no es muy elevado (entre el 45 y 75%), debido a que el cambio de dirección del aire provoca pérdidas por choque y remolinos; no obstante, son capa-

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA.2.2./243		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80



A) Ventilador

Tipos de rodete



a) Palas rectas

b) Palas adelante

d) Palas hacia atras

Figura. - 2.15.1. - Ventilador centrífugo y tipos de rodete.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./244		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80

ces de vencer resistencias al flujo de aire bastante elevadas, siendo obligado su uso en las instalaciones cuya pérdida de carga sea considerable.

15.2.2. Ventiladores Helicoidales

En un ventilador helicoidal, el flujo de aire sigue la dirección del eje del rodete, estando alineadas la entrada y la salida (Figura 2.15.2.).

El rodete tiene dos o más álabes, colocadas en ángulo hacia el eje, de forma similar a la hélice de un barco, que al girar provocan el desplazamiento del aire. Nótese que en este tipo de ventiladores, el sentido del flujo se invierte al invertir el sentido de giro del rodete.

En algunos casos, los álabes tienen perfiles aerodinámicos similares a las alas de los aviones y se llaman de ala portante, pero en la mayoría de casos, se utilizan álabes planos de chapa de acero o aluminio.

Los ventiladores helicoidales, son muy usados para aplicaciones de ventilación general, o de movimiento de aire, aunque aquí nos referiremos a ellos desde el punto de vista de su aplicación en extracción localizada, es decir, montado en el interior o el extremo de un conducto de extracción.

Un ventilador helicoidal, tiene la ventaja sobre el centrífugo de un mayor rendimiento mecánico (puede llegar al 95%), y el montaje es más sencillo, ya que se instala como un simple tramo de tubería, pero no puede vencer diferencias de presión muy elevadas, por lo que su uso queda limitado a las instalaciones que tengan poca pérdida de carga.

15.3. CARACTERISTICAS DE LOS VENTILADORES

Las prestaciones de un ventilador, ya sea centrífugo o helicoidal, se presentan mediante un gráfico o tabla de valores, llamados curvas características, o, simplemente, características del ventilador.

15.3.1. Determinación de las características

Las características de un ventilador se determinan mediante medidas de laboratorio en túneles aerodinámicos ajustados a normas (por ejemplo AMCA Standard 210-67, o British Standard 848).

Las características más importantes son :

- Presión total
- Presión estática
- Potencia absorbida
- Rendimiento

Todas las características se determinan a una velocidad determinada de rotación del ventilador que se anota como parámetro en la familia de curvas características. Los resultados se corrigen para expresar los referidos a aire a 760 mm.Hg. de presión y 20°C de temperatura (densidad 1.204 kg/m³), ya que las condiciones del gas vehiculado afectan a las características del ventilador. En toda la exposición que

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2, 2, / 245		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80

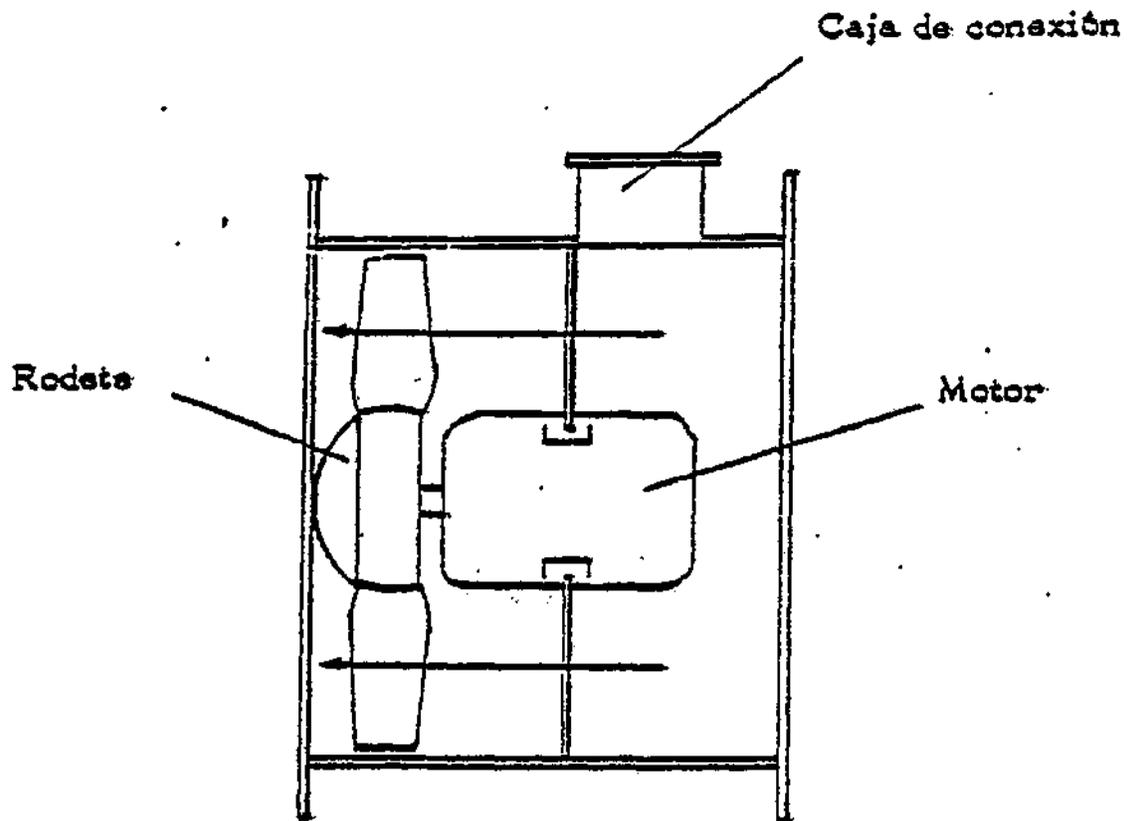


Figura. - 2.15.2. - Ventilador helicoidal.

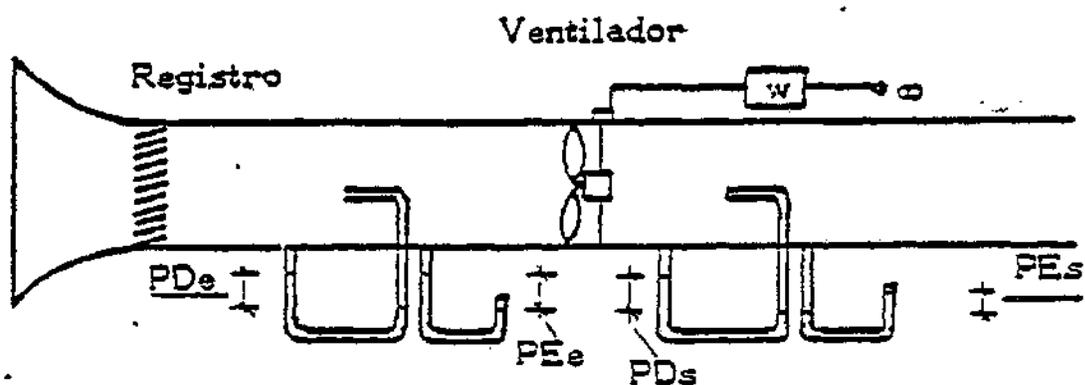


Figura. - 2.15.3. - Experimento para la determinación de las características.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2, 2 / 246		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80

sigue, nos referiremos siempre a aire en condiciones normales, y en el último párrafo del capítulo, estudiaremos las correcciones que se deben hacer debido a los cambios en las condiciones del aire.

La curva característica de presión total, es la representación de la energía comunicada a la unidad de volumen del gas, medida en unidades de presión, frente al caudal vehiculado por el ventilador. En la Figura 2.15.3. se representa el esquema de una instalación que permite la determinación de esta característica. La energía comunicada al gas se manifestará en un incremento de la presión total del fluido, es decir, $P_t = (P_{E_s} + P_{D_s}) - (P_{E_e} + P_{D_e})$, donde :

P_t = Incremento de presión total debido al ventilador.

P_E = Presión estática de la corriente de gas.

P_D = Presión dinámica de la corriente de gas.

El subíndice e, hace referencia a la entrada del ventilador, y el s, a la salida.

Todas estas variables tienen unidades de mm. cda. La representación de P_t frente al caudal, es la característica de presión total.

La representación de la potencia absorbida (W en la Figura 2.15.3.) frente al caudal, es la característica de potencia; generalmente, las unidades de potencia son el CV o el kw.

La característica de rendimiento es la comparación de las dos anteriores, ya que la primera es una medida de la energía comunicada al gas, y la segunda, mide la energía consumida por el ventilador; así pues, el rendimiento viene dado por :

$$\eta (\%) = \frac{Q \cdot P_t}{367.000W} \cdot 100$$

donde :

Q = Caudal (m^3/h)

P_t = Incremento de presión total (mm. cda.)

W = Potencia absorbida (kw)

η = Rendimiento

El factor 367.000 es el de conversión de mm. cda. m^3/h en kw.

Finalmente, la curva característica de presión estática, se obtiene restando de la presión total, la presión dinámica en la descarga del ventilador, es decir, volviendo a la Figura 2.15.3., la presión estática vendría dada por : $P_e = P_t - P_{D_s} = P_{E_s} - (P_{D_e} + P_{E_e})$

siendo :

P_e = Presión estática debida al ventilador

P_t = Presión total debida al ventilador

P_E = Presión estática de la corriente de gas

P_D = Presión dinámica de la corriente de gas

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA, 2.2. / 247		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER.	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80

Los subíndices e y s, hacen referencia a la entrada y salida del ventilador, respectivamente.

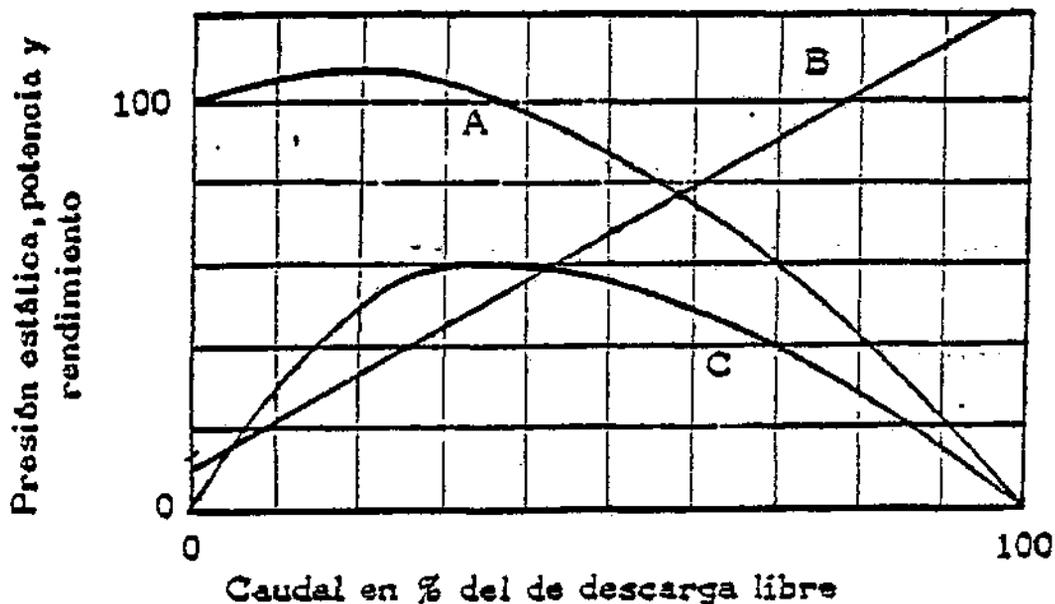
Todas las variables tienen unidades de mm.cda. El interés de esta característica es debido al hecho de que, generalmente, el ventilador se sitúa en el extremo del sistema de extracción, después de los conductos de extracción y el depurador, con la descarga directamente a la atmósfera; en estas condiciones, la presión de velocidad del aire en la descarga no se aprovecha y, por tanto, la característica de presión estática es la que se debe utilizar para determinar la energía que realmente nos suministrará un ventilador en estas condiciones de trabajo.

15.3.2. Estudio de las características

Ventiladores centrífugos

Las características de un ventilador centrífugo vienen influenciadas por el tipo de rodete, que puede ser de álabes rectos, inclinados hacia adelante o inclinados hacia atrás. (Figura 2.15.1.).

Un ventilador centrífugo con rodete de álabes rectos tiene una característica similar a la presentada en la Figura 2.15.4. La curva de presión estática presenta un máximo muy poco acusado para caudales bajos, y la curva de potencia crece de forma continua.



- A: Presión estática
- B: Potencia absorbida
- C: Rendimiento

Figura. - 2.15.4. - Características de un ventilador con palas rectas.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2,2, / 248		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80

Es necesario tener en cuenta este hecho, ya que si se hace funcionar el ventilador en descarga libre, se corre el riesgo de quemar el motor.

Un ventilador con rodete de álabes inclinados hacia adelante, tiene unas características tal como las indicadas en la Figura 2.15.5. Este diseño mueve más aire que otros, debido al efecto de cuchara del álabes, y el rendimiento es mejor que en el caso de álabes rectos, aunque el riesgo de quemar el motor es mayor, ya que la curva de potencia crece más bruscamente al aumentar el caudal de aire.

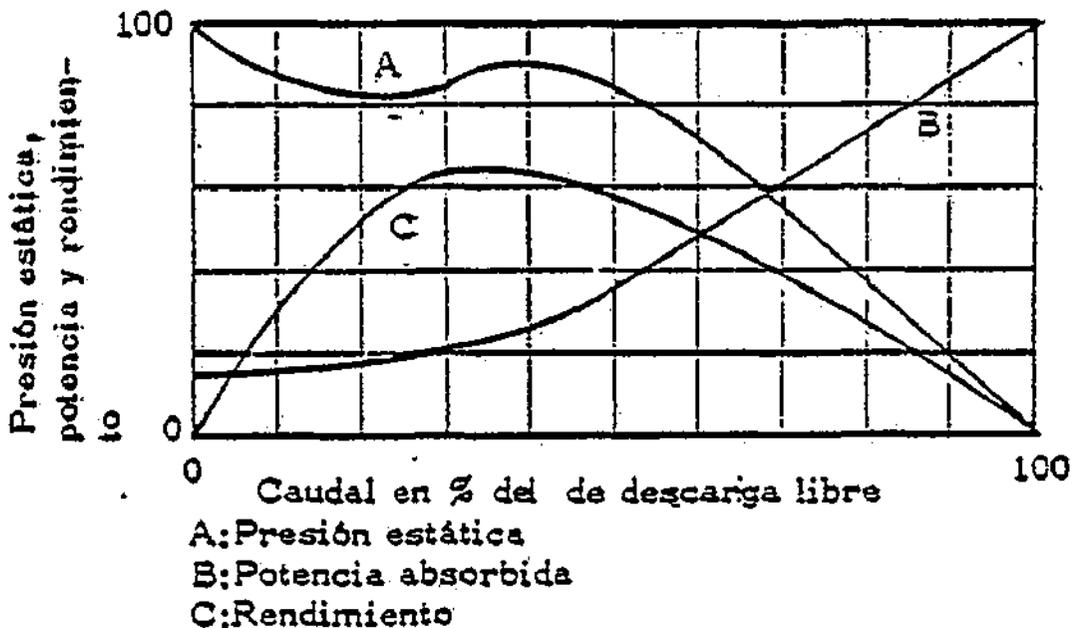


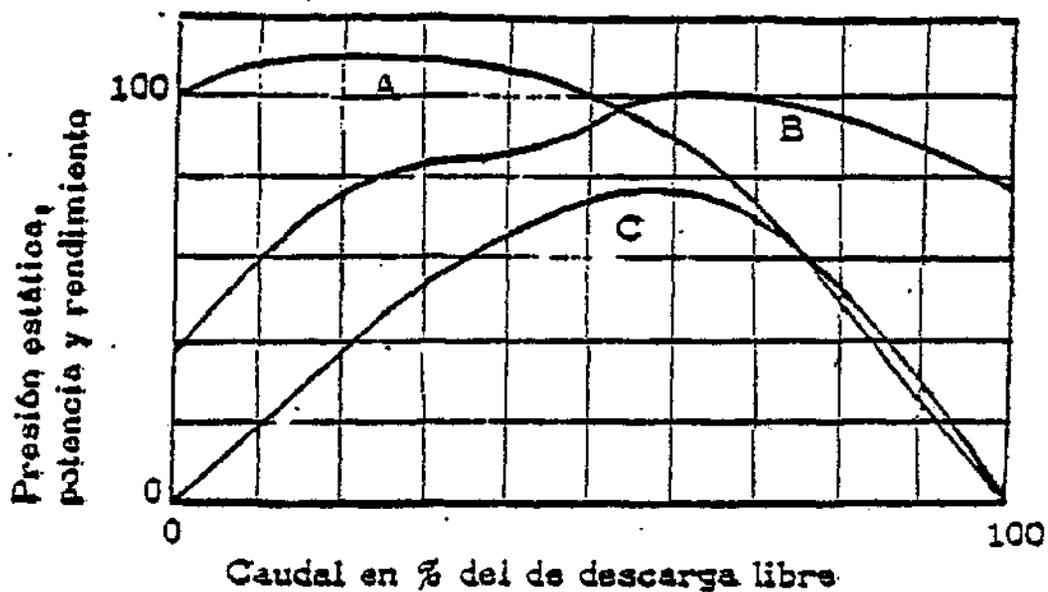
Figura. - 2.15.5. - Características de un ventilador con palas hacia adelante.

El mayor rendimiento en ventiladores centrífugos se obtiene cuando el rodete tiene álabes inclinados hacia atrás; el volumen de aire para un diámetro dado, es más pequeño que en el caso anterior, pero la presión es mayor. La Figura 2.15.6. muestra las características de este tipo. En este caso, la potencia absorbida es máxima en la zona normal de trabajo y, por tanto, no hay riesgo de quemar el motor si se hace trabajar el ventilador en descarga libre.

Ventiladores helicoidales

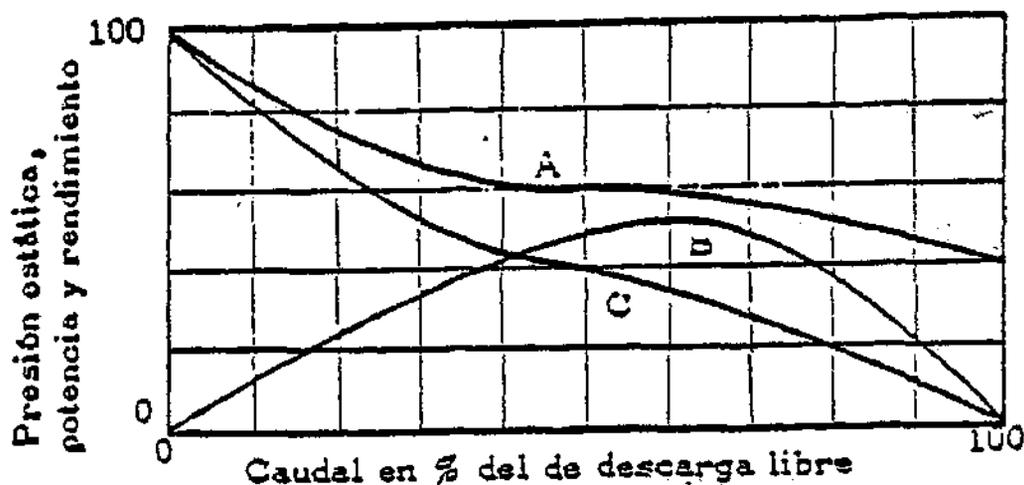
Las características de estos ventiladores, dependen de la forma y superficie de los álabes, del ángulo que formen con el eje y del hueco entre la extremidad de los álabes y la carcasa. En la Figura 2.15.7.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 249		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80



- A: Presión estática
- B: Potencia absorbida
- C: Rendimiento

Figura. - 2.15.6. - Características de un ventilador con palas hacia atrás.



- A: Potencia absorbida
- B: Rendimiento
- C: Presión estática

Figura. - 2.15.7. - Características de un ventilador helicoidal.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2.1 / 2.5.0		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80

se presentan sus características. Aquí la potencia absorbida disminuye al aumentar el caudal, por lo que el riesgo de sobrecarga del motor ocurre si el ventilador trabaja con la descarga obturada.

Una mejora considerable en las características, se obtiene colocando, antes o después del rodete, unas aletas fijas que corrijan el movimiento helicoidal que tiene el aire al salir del rodete, o mejor aún, colocando dos rodetes iguales que giren en sentidos opuestos.

Con estas modificaciones, se obtienen ventiladores de gran rendimiento, cuyas características típicas se presentan en la Figura 2.15.8.

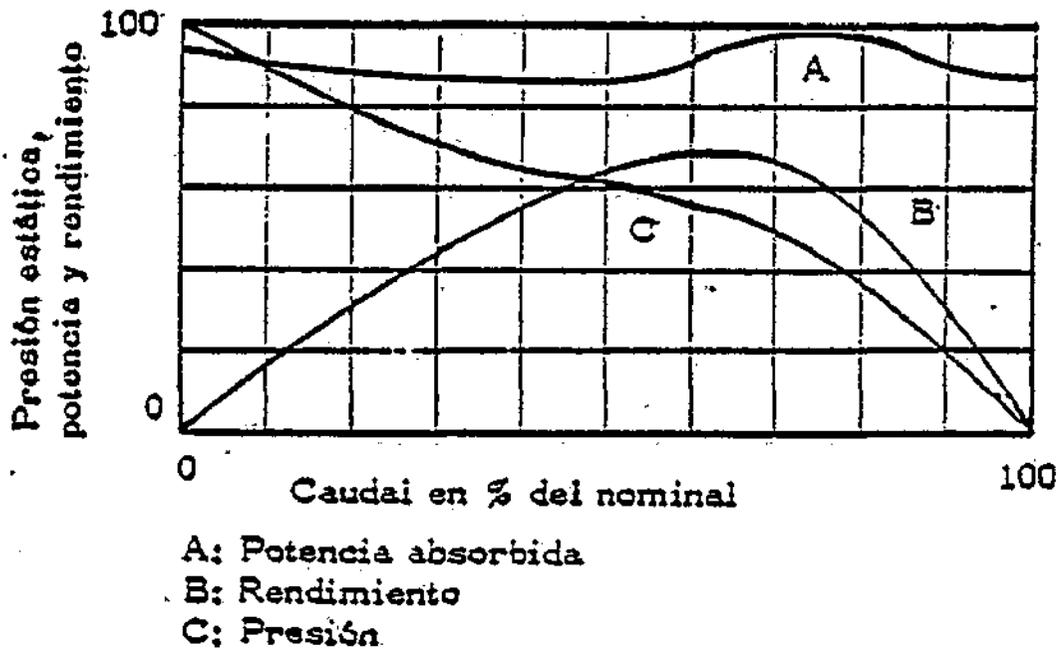


Figura. - 2.15.3. - Características de un ventilador helicoidal con aletas directrices.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 251		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80

15.4. LEYES DE LOS VENTILADORES

Cuando un mismo ventilador se somete a un régimen de marcha distinto al usado en la determinación de las características, se pueden predecir los resultados a partir de los datos conocidos mediante una serie de relaciones sencillas, que también son válidas cuando se trata de ventiladores con relaciones geométricas semejantes.

Las variables de un ventilador, dejando aparte la geometría, son : la velocidad de rotación (U); el diámetro del rodete (D); la presión estática, dinámica o total (Pe, Pd, Pt); el caudal (Q); la potencia absorbida (W) y el rendimiento (η).

Las leyes de los ventiladores se pueden expresar como sigue :

$$\frac{Q}{Q_o} = \frac{U}{U_o} \left(\frac{D}{D_o} \right)^3$$

$$\frac{P}{P_o} = \left(\frac{U}{U_o} \right)^2 \cdot \left(\frac{D}{D_o} \right)^2$$

$$\frac{W}{W_o} = \left(\frac{U}{U_o} \right)^3 \cdot \left(\frac{D}{D_o} \right)^5$$

Las variables con subíndice o, son los valores conocidos y las que no tienen subíndice, son los valores en las condiciones desconocidas.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que la densidad del aire también influye en las características; a pesar de ello, en las ecuaciones anteriores, no aparece esta variable, ya que se ha supuesto que se trabaja con aire standard. En un párrafo posterior de este capítulo, se estudia el problema de la influencia de la densidad del aire en el comportamiento de los ventiladores.

15.5. COMPORTAMIENTO DINAMICO

15.5.1. Punto de funcionamiento

Consideremos ahora el problema de determinar el punto de funcionamiento de un sistema de extracción, o lo que es lo mismo, determinar el caudal de aire que circulará por el sistema al poner en funcionamiento el ventilador.

Supongamos un sistema de extracción localizada, tal como el representado en la Figura 2.15.9.

Una vez alcanzado el equilibrio, se puede aplicar el teorema de Bernoulli entre un punto exterior y el punto I. Teniendo en cuenta que en el exterior, tanto la presión dinámica como la estática, son prácticamente nulas, se puede escribir :

$$0 + 0 = PE_1 + PD_1 + \Delta F$$

siendo ΔF , la pérdida de carga en el sistema de extracción.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2. / 252		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80

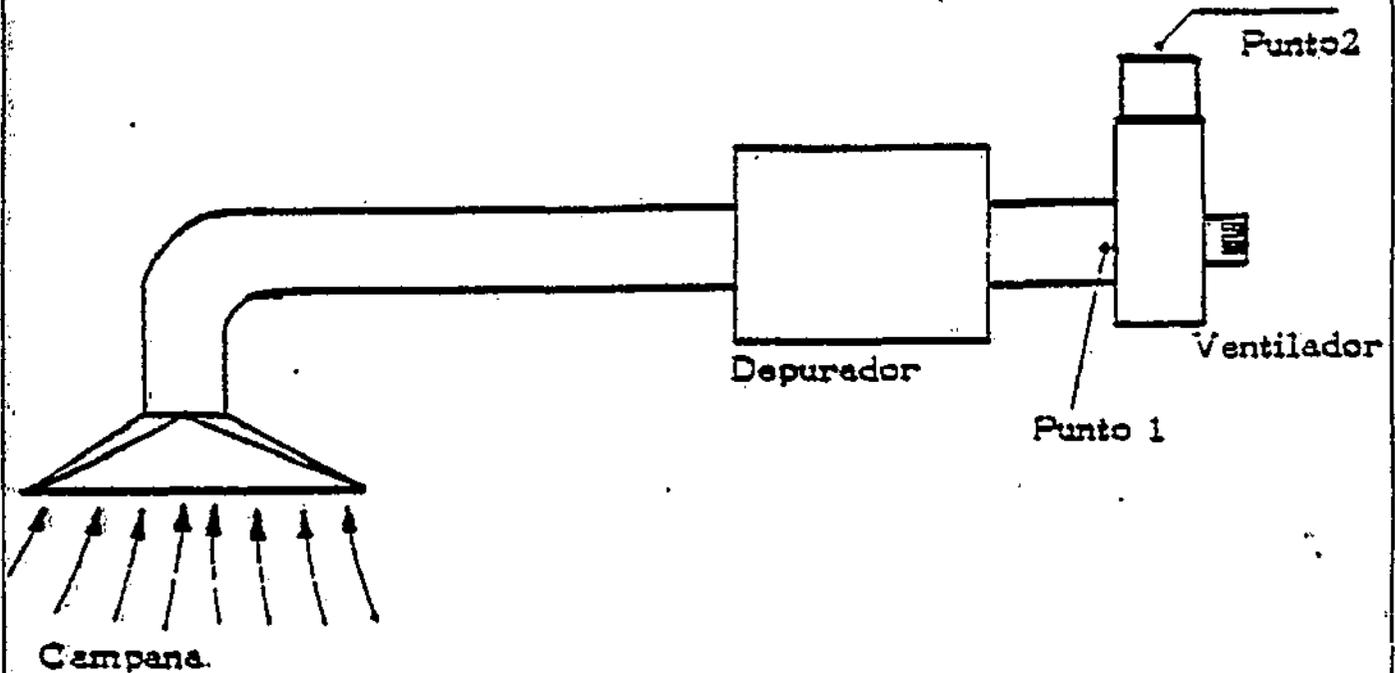


Figura. - 2.15.9. - Esquema de una extracción simple.

La aplicación del mismo teorema entre los puntos 1 y 2, nos lleva a :

$$PE_1 + PD_1 + Pt = 0 + PD_2$$

ya que en la descarga del ventilador, la presión estática es nula.

Combinando las dos anteriores, llegamos a :

$$P = Pt - PD_2 = Pe$$

Es decir, el equilibrio se alcanza cuando el caudal de aire es tal, que la pérdida de carga ocurrida en el sistema es igual a la presión estática suministrada por el ventilador.

Si se representan en unos ejes cartesianos, con coordenadas presión y caudal, la curva característica de presión estática del ventilador y la curva de pérdida de carga en el sistema en función del caudal (característica del sistema), el punto de corte de ambas, será el punto de funcionamiento, y la abscisa de ese punto, será el caudal que circulará por el sistema de extracción localizada (Figura 2.15.10).

Este método no es general, y sólo es de aplicación cuando el ventilador descarga directamente a la atmósfera. Si el ventilador está situado en un punto intermedio del sistema de extracción, tal como se indica en la Figura 2.15.11., la aplicación del teorema de Bernoulli, una vez alcanzado el equilibrio, da

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2. / 253		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	15	CAPITULO :	VENTILADORES	01	10	80

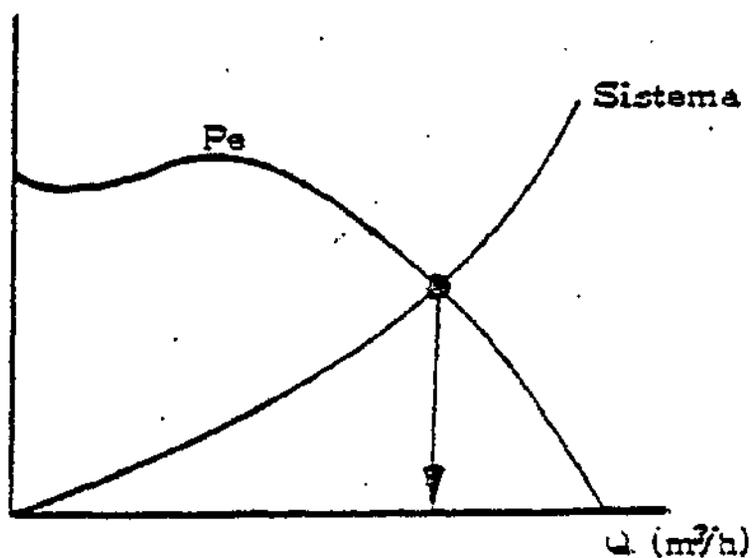


Figura. - 2.15.10. - Determinación del punto de funcionamiento.

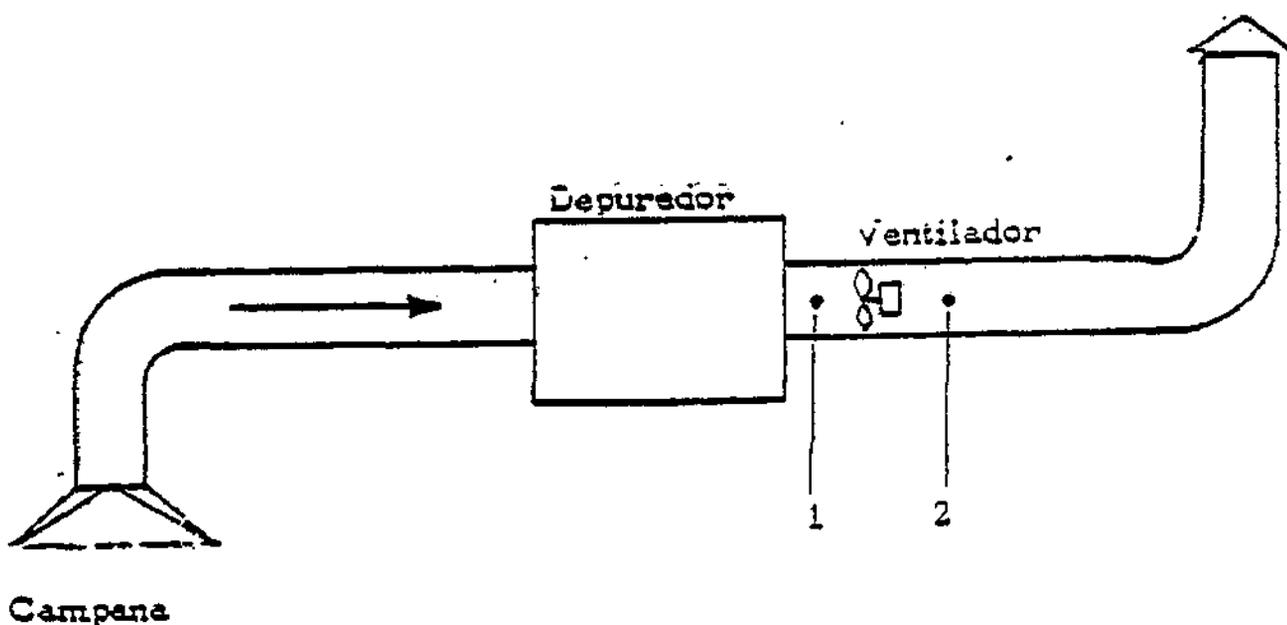


Figura. - 2.15.11. - Sistema de extracción con el ventilador intercalado.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2,2, / 254		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	15	CAPITULO :	VENTILADORES	01	10	80

Los resultados siguientes :

- Entre la entrada y el punto 1
 $0 + 0 = PE_1 + PD_1 + P_1$
- Entre el punto 2 y la salida
 $PE_2 + PD_2 = 0 + PD_s + P_2$
- Entre los puntos 1 y 2
 $PE_1 + PD_1 + Pt = PE_2 + PD_2$
- De los que se deduce
 $Pt = P_1 + P_2 + PD_s$

Es decir, que en el caso general se deben comparar la pérdida de carga del sistema incrementada en la presión dinámica existente en el punto de descarga y la presión total suministrada por el ventilador.

Si no se dispone de la curva característica de presión total, se puede utilizar la de presión estática, teniendo en cuenta que :

$$Pt = Pe + PD_2$$

y por tanto :

$$Pe = \Delta P_1 + \Delta P_2 + PD_s - PD_2$$

Por tanto, en general, el punto de funcionamiento se producirá a un caudal tal que la presión estática suministrada por el ventilador, sea igual a la pérdida de carga del sistema, incrementada con la presión dinámica en la descarga a la atmósfera y disminuida con la presión dinámica en la descarga del ventilador.

Generalmente, el término $PD_s - PD_2$ es despreciable comparado con las pérdidas de carga del sistema y no se comete mucho error al considerar que la presión estática debe igualar a la pérdida de carga.

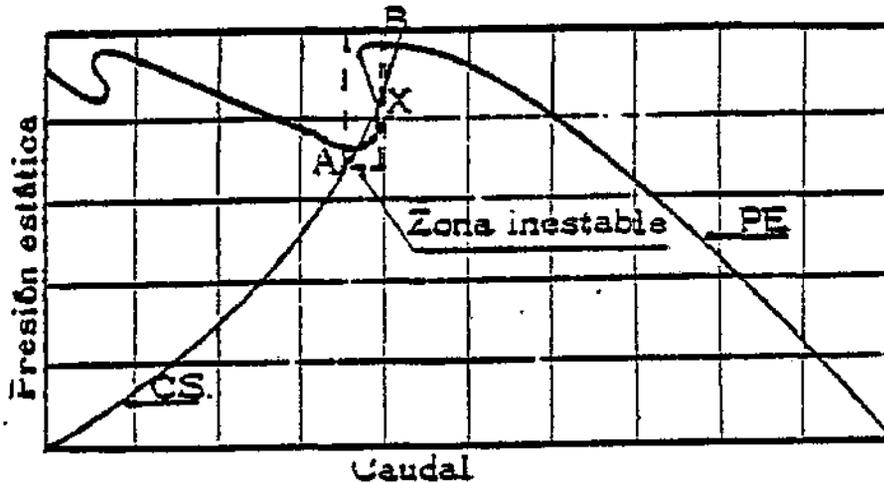
15.5.2. Estabilidad

El funcionamiento de un ventilador es estable si permanece inalterable después de una ligera perturbación momentánea, o si una ligera perturbación permanente, produce sólo un pequeño desplazamiento del punto de trabajo.

La inestabilidad se manifiesta en pulsaciones del aire y se produce cuando la curva del sistema corta a la característica del ventilador en dos o más puntos.

Este hecho no suele ocurrir cuando se utiliza un sólo ventilador, pero si se conectan dos o más ventiladores en paralelo, es posible que la característica resultante posea una zona inestable como la indicada en la Figura 2.15.12. En esta Figura, se observa que la característica del sistema corta a la del ventilador en tres puntos, es decir, son posibles tres puntos de funcionamiento, pero el señalado como x, es inestable; en efecto, supongamos que el caudal sufre un aumento momentáneo debido a cualquier causa (abertura de un registro, incremento de la tensión, etc.) al aumentar el caudal, la presión suministrada por el ventilador, es mayor que la pérdida de carga y, en consecuencia, aparecerá una diferencia

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2.1.2.55		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	15	CAPITULO :	VENTILADORES	01	10	80



PE: Presión estática
CS: Característica del sistema.

Figura. - 2.15.12. - Inestabilidad del sistema.

de presión que incrementará la velocidad del aire, aumentando el caudal, aunque la causa original haya desaparecido, llegando hasta el punto B, si ahora otra modificación momentánea hace disminuir el caudal por debajo del punto X, la evolución no se detendrá hasta llegar al punto A, es decir, el sistema es inestable entre los puntos A y B, con excepción del punto X, que es cuasiestable.

A fin de evitar inestabilidades y obtener un rendimiento elevado, el punto de funcionamiento se debe elegir siempre en la zona descendente de la curva característica de presión.

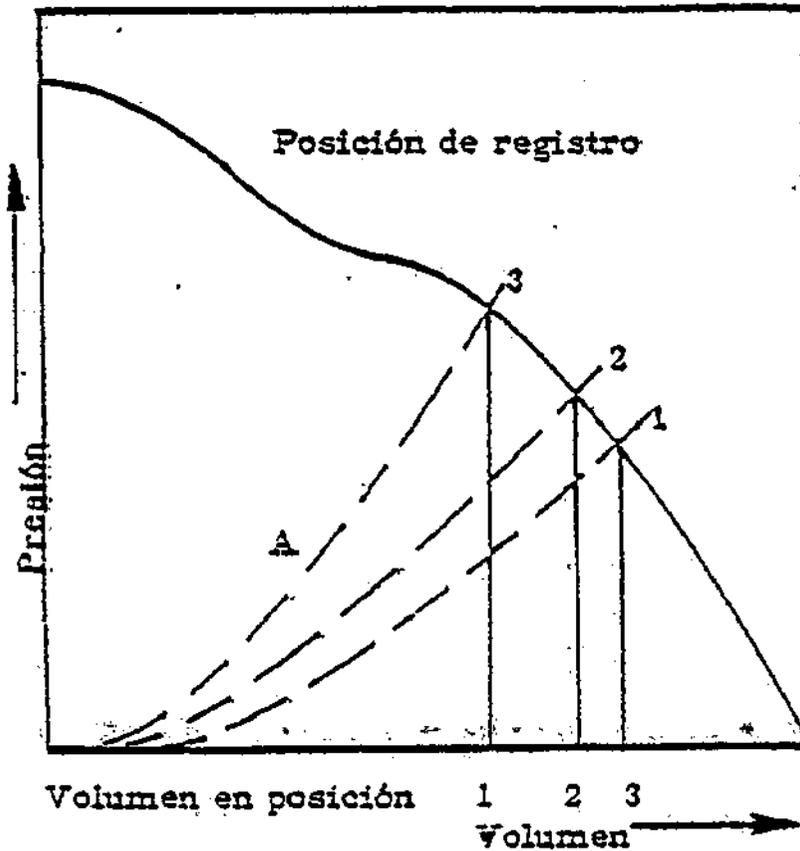
15.5.3. Regulación del punto de funcionamiento

A veces es necesario poder regular el flujo de aire en un sistema. Esta operación se realiza en la mayoría de casos con un registro. La acción de un registro es un aumento o disminución de la resistencia al paso del aire, mediante un estrangulamiento, con lo que se varía la característica del sistema y el flujo se obtiene trabajando a lo largo de la característica del ventilador como se muestra en la Figura - 2.15.13.

Este sistema es satisfactorio para ventiladores centrífugos, pero en los helicoidales se alcanza enseguida la zona alta de la característica de presión, con un descenso muy brusco del caudal y riesgo de sobrecarga del motor, por lo que se debe elegir un ventilador de bastante más capacidad de presión que

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2,2, / 2,56		
	3	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80

La necesaria para el servicio normal de la instalación. Además si el ventilador helicoidal tiene el motor incorporado, un estrangulamiento excesivo impediría la correcta refrigeración del mismo.



A: Resistencia del sistema

Figura 2.15.13. - Regulación por registro.

En la mayoría de ventiladores axiales, el control de flujo se realiza mediante un "by-pass" o derivación (Figura 2.15.14.). Cuando el paso está cerrado, la resistencia del sistema y la curva del ventilador, determinarán el punto de funcionamiento M. Al abrir la derivación, la nueva curva del sistema, se puede determinar gráficamente, tal como se indica en la Figura 2.15.15. Esta curva, junto con la característica del ventilador, nos dará el nuevo punto de funcionamiento del ventilador Q, pero el caudal total se repartirá entre el sistema y el "by-pass", tal como se indica en la Figura 2.15.15.

Por otra parte, en un ventilador helicoidal, se disminuye la potencia consumida al aumentar el caudal, por lo que este sistema tiende a disminuir el consumo de potencia y no hay riesgo de sobrecarga del motor.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2,2, / 257		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.L. MINER	15	CAPITULO :	VENTILADORES	01	10	80

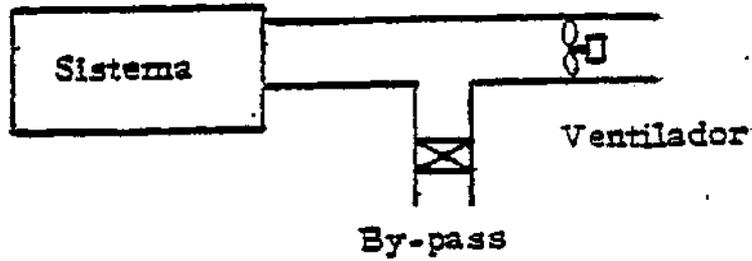


Figura. - 2.15.14. - Regulación por "by-pass" (Esquema).

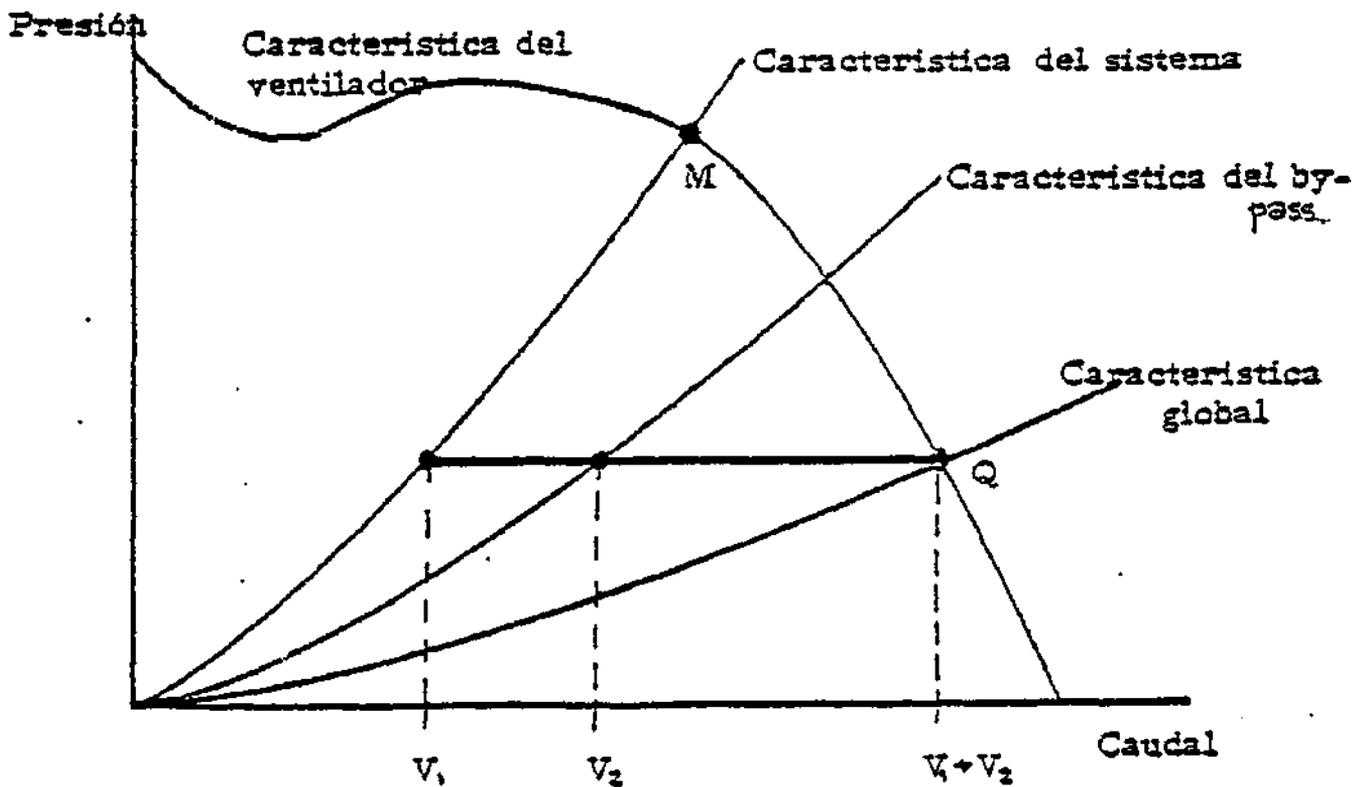


Figura. - 2.15.15. - Regulación por "by-pass".

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 258		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E. O. L. M I N E R	15	CAPÍTULO :	VENTILADORES	01	10	80

En los dos sistemas anteriores, la regulación se obtiene moviéndose sobre la característica del ventilador, pero el sistema ideal es moverse sobre la característica del sistema, lo cual se puede realizar, actuando sobre la velocidad de giro del rodete; ello equivale a desplazar la curva característica del ventilador dejando igual la del sistema.

La economía de este tipo de regulación, es obvia, ya que el flujo es directamente proporcional a la velocidad de giro, y la potencia consumida al cubo de la velocidad. A pesar de ello, los mecanismos para la regulación de velocidad, son caros y delicados, por lo que la economía anterior se compensa rápidamente y este tipo de regulación es poco utilizada en la práctica.

En la Figura 2.15.16. se comparan los consumos de potencia con el caudal, según el sistema de regulación usado en ventiladores helicoidales.

15.6. ACOPLAMIENTO DE VENTILADORES

Cuando los requerimientos de un sistema de extracción localizada exigen grandes variaciones, puede ser conveniente utilizar más de un ventilador de forma que, en conjunto, den el caudal o presión exigidos y que al aislar uno o varios, los que queden funcionando, cumplan con los requisitos necesarios en el nuevo régimen de trabajo.

Los ventiladores se pueden acoplar en serie o en paralelo.

15.6.1. Acoplamiento en serie

Consiste en colocar un ventilador a continuación de otro, y tal como se ha mencionado al hablar de los tipos de ventiladores, si éstos son helicoidales, se pueden acoplar con el mismo sentido de giro, o con sentidos opuestos. En cualquier caso, el caudal es el mismo que con sólo un ventilador, pero se consigue un incremento de presión del 50 % en el primer caso, y hasta un 300 % en el caso de giros opuestos.

La característica global del acoplamiento sólo puede determinarse si se trata de ventiladores centrífugos o helicoidales con aletas directrices, ya sea a la entrada o a la salida.

La característica de presión total, viene dada por la suma de características de presión total para el mismo caudal.

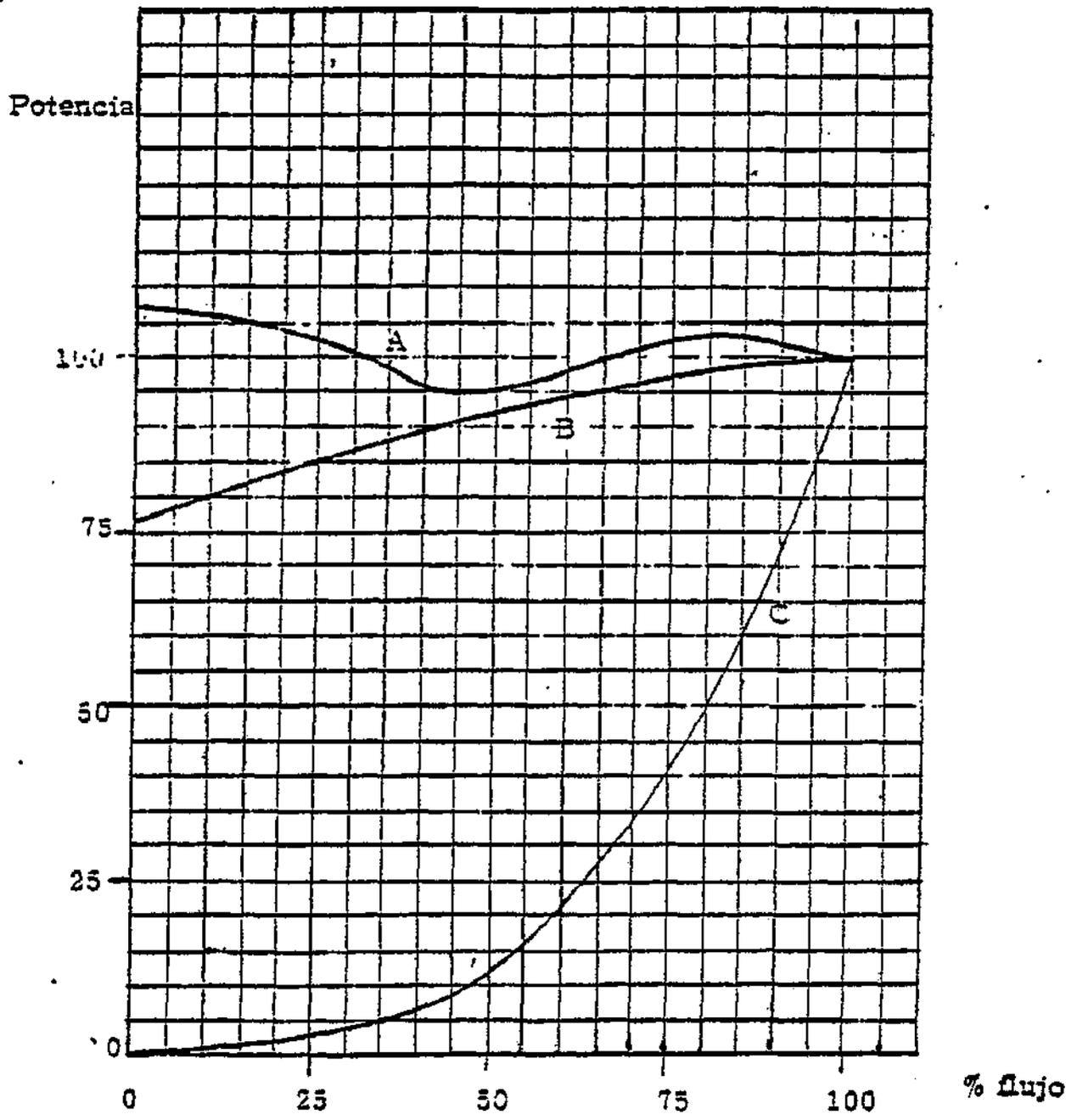
La curva de presión estática, se puede deducir restando a la de presión total global, la de presión dinámica del segundo ventilador, es decir :

$$P_e = P_{t_1} + P_{t_2} - P_{d_2} = P_{t_1} + P_{e_2}$$

Para simplificar, supongamos dos ventiladores iguales conectados en serie, cuyas curvas características sean P_{t_1} y P_{e_2} de la Figura 2.15.17., y sea P_e y P_t las curvas características del conjunto.

En el punto M correspondiente al caudal en descarga libre de un ventilador solo, el conjunto de ambos suministra todavía una presión estática, pudiéndose alcanzar con el conjunto, un caudal de descarga libre superior.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA. 2.2. / 259		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	15	CAPITULO :	VENTILADORES	01	10	80



- A: Registro
- B: By-pass
- C: Ideal

Figura. - 2.15.16. - Comparación del consumo de potencia según el modo de regulación.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 260		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	15	CAPITULO :	VENTILADORES	01	10	80

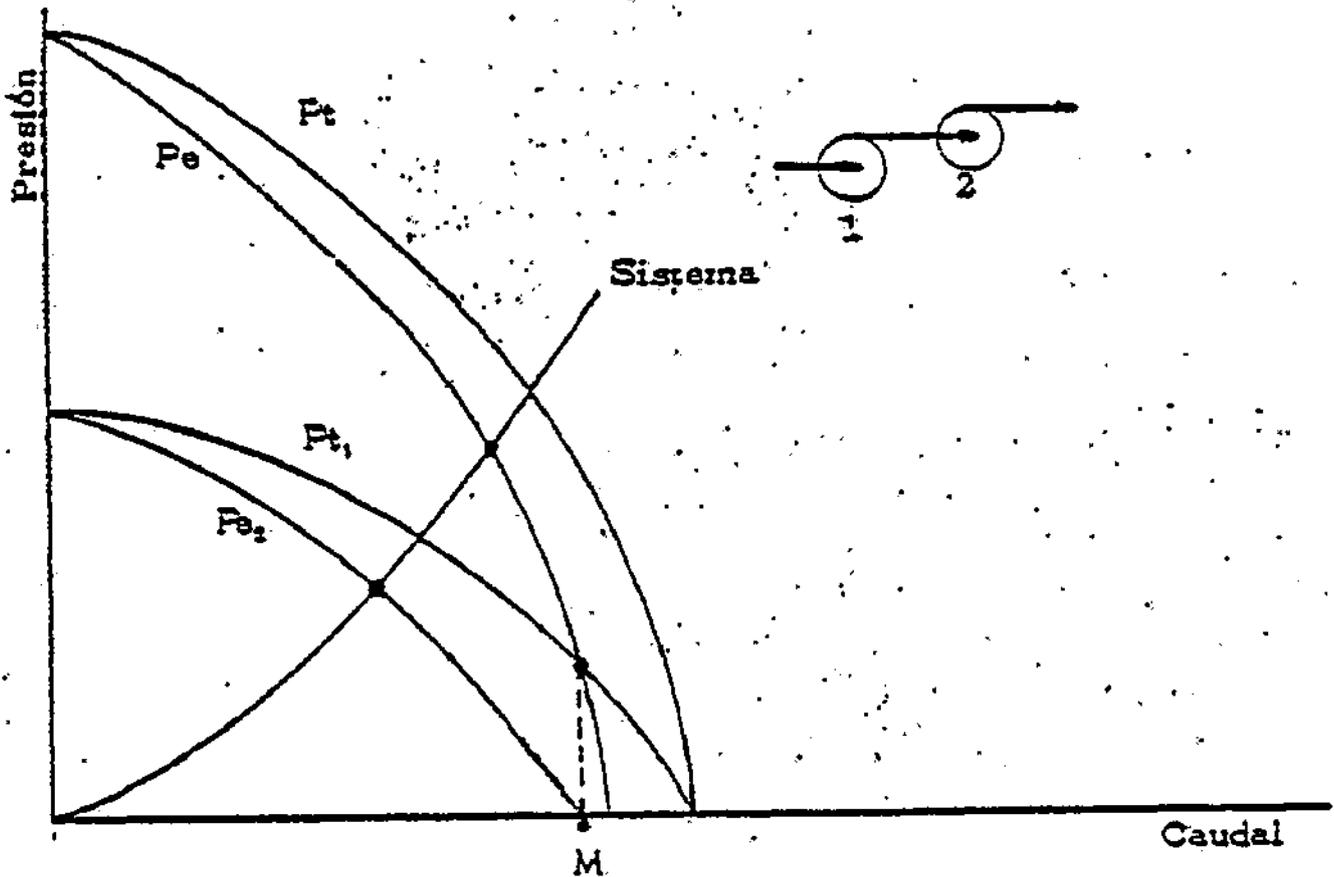


Figura. - 2.15.17. - Acoplamiento en serie.

15.6.2. Acoplamiento en paralelo.

En un acoplamiento en paralelo, los ventiladores aspiran el aire del mismo lugar y descargan en un mismo sentido de la canalización uniéndose de nuevo los caudales individuales.

Las curvas características de presión, se obtienen sumando los caudales servidos por cada ventilador a cada presión. Este método no es rigurosamente exacto, pero es suficiente en la práctica para estudiar el comportamiento del conjunto.

Observando la Figura 2.15.18., es evidente que el caudal obtenido con dos aparatos en paralelo, no es nunca la suma de los caudales individuales, ya que la curva del sistema no es una horizontal, sino una parábola.

En la Figura 2.15.19., se ha representado la característica de un ventilador centrífugo con las palas hacia adelante (C) y la resultante (R) de acoplar en paralelo dos unidades, calculado del modo que se ha

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2. / 261		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	15	CAPITULO :	VENTILADORES	01	10	80

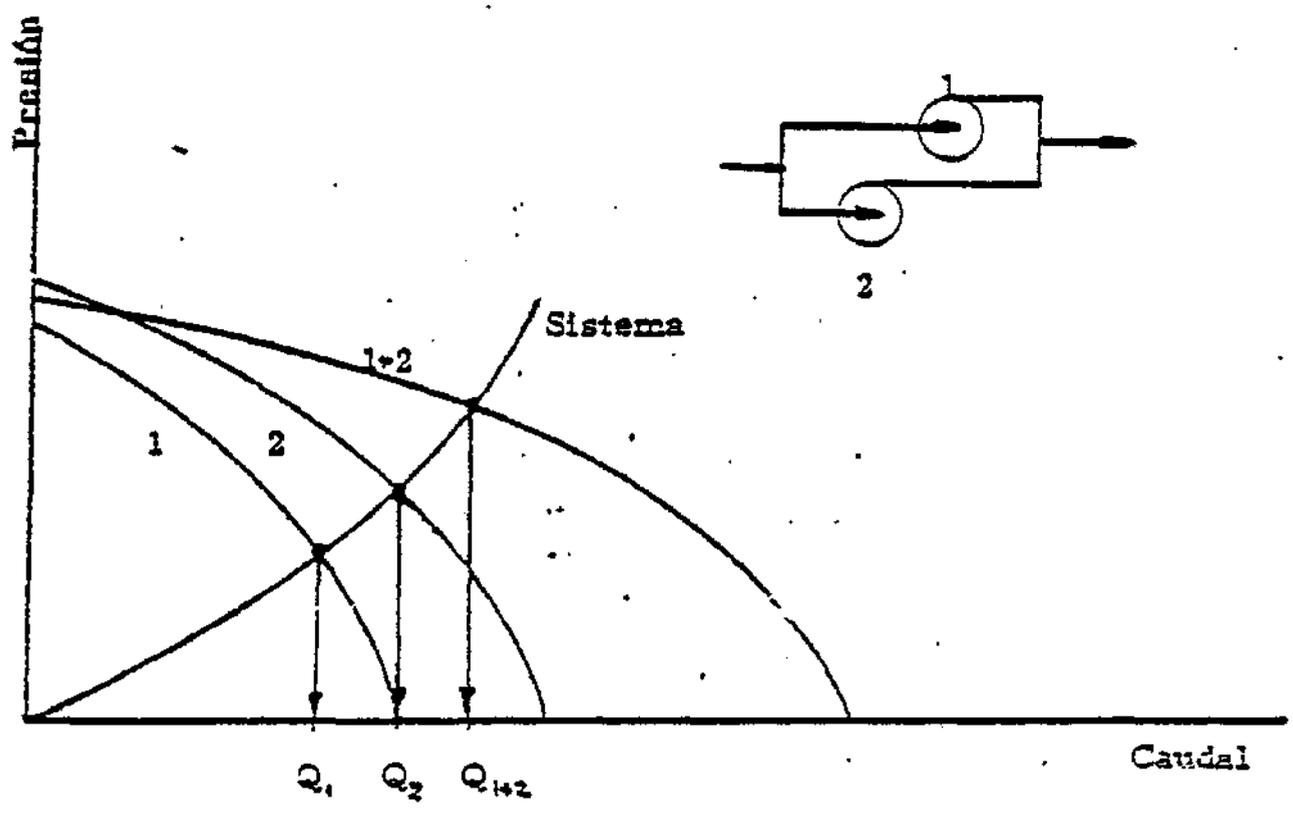


Figura . - 2.15.18. - Acoplamiento en paralelo.

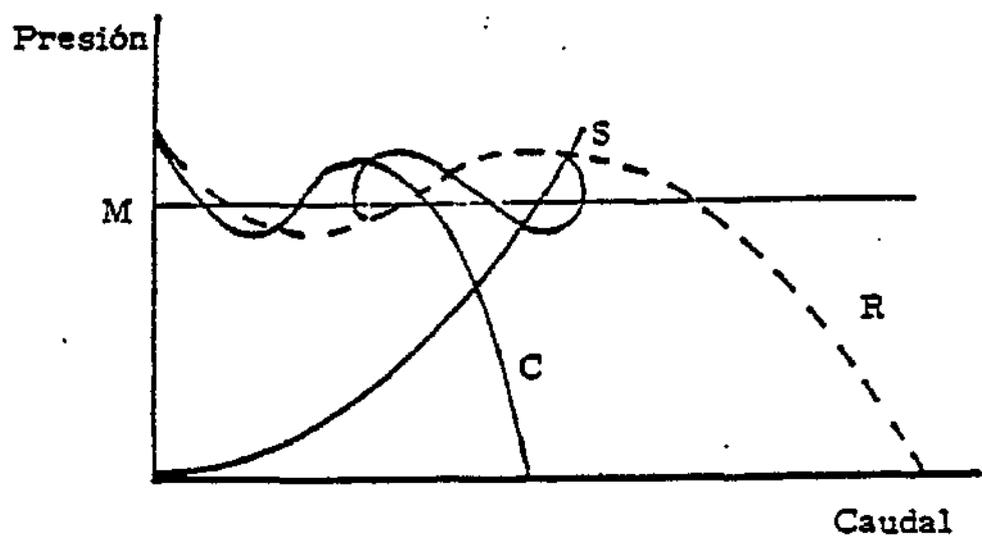


Figura . - 2.15.19. - Acoplamiento en paralelo de dos ventiladores iguales.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	ÁREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2. / 262	
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A	
E.O.I. M I N E R	15	CAPITULO :	VENTILADORES	01	10 80

Indicado. En el punto de ordenada M, la resultante no queda definida unívocamente, ya que son posibles seis sumas y la resultante puede tomar formas muy complejas con posibilidad de inestabilidad, como sería el caso del sistema representado por S.

El problema se complica cuando los ventiladores acoplados no son iguales y tienen características muy distintas, tal como los C_1 y C_2 de la Figura 2.15.20. En la zona de baja presión no hay ningún problema, pero para presiones superiores a la máxima del ventilador más pequeño (P_1) resultará que la presión suministrada por el ventilador mayor, establecerá una corriente en sentido contrario por el más pequeño, y el caudal global será inferior al suministrado por el ventilador mayor trabajando solo. Geométricamente, es como si la característica del ventilador se prolongase en la zona de caudales negativa para presiones elevadas.

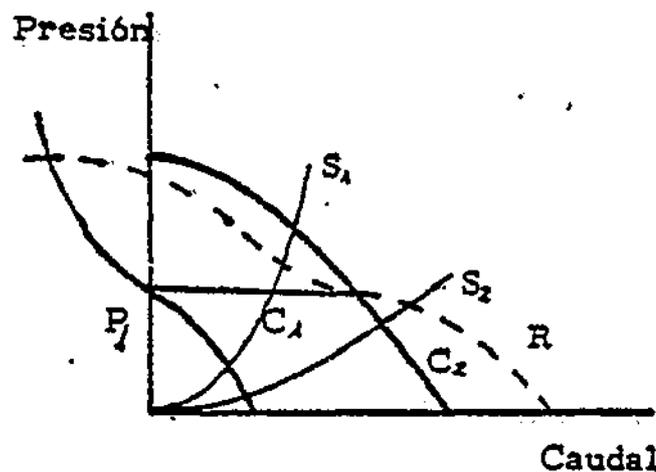


Figura. - 2.15.20. - Acoplamiento en paralelo de dos ventiladores distintos.

Este acoplamiento sería útil para un sistema cuya característica fuese S_2 , pero desastroso en un sistema de característica S_1 .

En conclusión, el acoplamiento de ventiladores es delicado y debè hacerse un estudio previo de las características de los ventiladores a acoplar y de la característica del sistema, para asegurarse de que el punto de trabajo resultante cae en una zona adecuada; es recomendable, además, que los ventiladores que se acoplen sean iguales, ya que entonces es posible hacer trabajar a ambos en la zona de máximo rendimiento, cosa que es casi imposible si son diferentes.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA : INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2, 2, / 263		
	2	TEMA : CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. M I N E R	15	CAPITULO : VENTILADORES	01	10	80

15.7. INFLUENCIA DE LA PRESION Y LA TEMPERATURA

Hasta aquí nos hemos referido siempre a aire a 1 atm. de presión y 20°C de temperatura, conocido como aire standard, cuya densidad es 1.204 kg/m³. Las variaciones de presión y temperatura, ocasionan variaciones de la densidad del aire que, a su vez, ocasionan cambios en la potencia absorbida por el ventilador o en la presión suministrada por el mismo.

Para efectuar correcciones, es más útil operar con la densidad relativa, en vez de la absoluta, que se define como :

$$d = \frac{p}{1.204}$$

siendo :

d = densidad relativa

p = densidad absoluta del aire (kg/m³)

1.204 = densidad absoluta del aire standard (kg/m³)

La densidad relativa se relaciona con la presión y la temperatura, según la expresión :

$$d = \frac{P}{(T + 273)} \cdot \frac{293}{760}$$

siendo :

P = presión atmosférica (mmHg)

T = temperatura del aire (°C)

La presión (estática o total) suministrada por un ventilador, es proporcional a la densidad relativa del aire que vehicula. Por otra parte, como la resistencia del sistema también es proporcional a la densidad relativa, resulta que el caudal no se ve afectado por la densidad. En consecuencia, la potencia absorbida será proporcional a la densidad, ya que viene dada por el producto de la presión por el caudal.

Cuando un sistema de extracción localizada deba diseñarse para trabajar con aire en condiciones distintas a las normales, se deben realizar los cálculos del sistema como si se tratara de aire en condiciones normales, y elegir el ventilador que suministra el caudal adecuado de aire standard. Únicamente la potencia necesaria debe ser corregida, multiplicando el valor dado en las características por la densidad relativa.

Asimismo, las presiones estáticas existentes realmente en el sistema, no serán las calculadas con aire standard, sino que serán proporcionales a la densidad relativa.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./264.		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	16	CAPITULO: LEGISLACION DE APLICACION	01	10	80

16.1. INTRODUCCION

La redacción de un tema que pretendiese abarcar una panorámica general de las distintas disposiciones legales por las que se regula la contaminación de la atmósfera, resultaría una labor excesivamente extensa y fuera de lugar en el presente Manual. Por otra parte, la normativa en esta materia es una cosa viva, que cambia a medida que su puesta en marcha permite contrastar lo legislado con la viabilidad práctica de sus disposiciones en el caso de nuestro país y, por tanto, cualquier tema escrito en este sentido, quedaría rápidamente obsoleto.

En consecuencia, se ha preferido incluir una lista con la legislación actualmente en vigor con indicación de su temática, fecha de promulgación y fecha de publicación en el B.O.E.

Por su importancia singular se han incluido expresamente en este tema, la relación de los principales contaminantes de la atmósfera, así como los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera para las principales actividades industriales, potencialmente contaminadoras de la atmósfera.

16.2. LISTA DE LEGISLACION DE APLICACION

- 1) Ley 38/1972 de 22 de Diciembre de Protección del Ambiente Atmosférico. (BOE, 26 de Diciembre de 1972).
- 2) Decreto 384/1973 de 22 de Febrero, por el que se determinan las actividades prioritarias a efectos de concesión de crédito oficial. (Presidencia del Gobierno. BOE del 12 de Marzo de 1973).
- 3) Decreto 795/1975 de 20 de Marzo, por el que se desarrolla el artículo II de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico. (Ministerio de Hacienda. BOE del 18 de Abril de 1975).
- 4) Decreto 833/1975 de 6 de Febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de 22 de Diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico. (Ministerio de Planificación del Desarrollo. BOE 22-4-75).
- 5) Decreto 2204/1975 de 23 de Agosto, por el que se tipifican las características, calidades y condiciones de empleo de los combustibles y carburantes. (Ministerio de Industria. BOE 19-9-75).
- 6) Decreto 406/1976 de 20 de Febrero, por el que se crea e integra en el Organismo autónomo Administración Institucional de la Sanidad Nacional, el Centro Regional de Sanidad Ambiental de Cataluña. (Ministerio de la Gobernación. BOE 9-3-76).
- 7) Orden de 30 de Marzo de 1976 por la que se regula la tramitación de la concesión de los beneficios a que se refiere el artículo II de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico y de los expedientes de pérdida de los mismos. (Ministerio de Hacienda. BOE 6-4-76).
- 8) Orden de 28 de Julio de 1976, por la que se declara la actividad de fabricación del cemento incluida en el supuesto del artículo 12 del Decreto 1773/1976 de 7 de Junio. (Ministerio de Industria. BOE del 7-8-76).
- 9) Orden de 10 de Agosto de 1976 por la que se establecen las normas técnicas para el análisis y valoración de los contaminantes de naturaleza química presentes en la atmósfera. (Ministerio de la Gobernación. BOE 5-11-76).
- 10) Corrección de errores de la Orden de 10 de Agosto de 1976 por la que se establecen las normas técnicas para el análisis y valoración de los contaminantes de naturaleza química presentes en la atmósfera. (Ministerio de la Gobernación. BOE 10-1-77).

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA: INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./265		
	2	TEMA: CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	16	CAPITULO: LEGISLACION DE APLICACION	01	10	80

- 11) Orden de 18 de Octubre de 1976 sobre prevención y corrección de la contaminación industrial de la atmósfera. (Ministerio de Industria. BOE 3-12-76).
- 12) Corrección de errores de la Orden de 18 de Octubre de 1976 sobre prevención y corrección de la contaminación industrial de la atmósfera. (Ministerio de Industria. BOE 23-2-77).
- 13) Orden de 1 de Febrero de 1977 sobre la Red Nacional de Vigilancia y Prevención de la Contaminación Atmosférica. (Ministerio de la Gobernación. BOE 18-2-77).
- 14) Real Decreto 1310/1977 de 23 de Abril por el que se actualizan la organización y normas de funcionamiento de la Comisión Interministerial del Medio Ambiente. (BOE 14-6-77).
- 15) Resolución de la Dirección General de Sanidad por la que se incorpora a la Red Nacional de Vigilancia y Prevención de la Contaminación Atmosférica, el Centro de Análisis de la Contaminación Atmosférica de la Delegación de Saneamiento y Medio Ambiente del Excelentísimo Ayuntamiento de Madrid. (Ministerio de la Gobernación. BOE 24-6-77).
- 16) Real Decreto 3322/1977 de 16 de Diciembre por el que se declaran aplicables a los términos municipales comprendidos en el área del Gran Bilbao las medidas y beneficios previstos en el título tercero del Decreto 833/1975, de 6 de Febrero. (Presidencia del Gobierno. BOE 28-12-77).
- 17) Orden de 20 de Octubre de 1978 por la que se fija el tipo de combustible que han de consumir las instalaciones industriales en el área del Gran Bilbao. (BOE 24-10-78).
- 18) Real Decreto 2512/1978 de 14 de Octubre para aplicación del artículo 11 de la Ley 38/1972 de 22 de Diciembre. (BOE 28-10-78).

16.3. RELACION DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES DE LA ATMOSFERA Y NIVELES DE EMISION DE CONTAMINANTES A LA ATMOSFERA PARA LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES INDUSTRIALES POTENCIALMENTE CONTAMINADORAS DE LA ATMOSFERA.

16.3.1. Relación de los principales contaminantes de la atmósfera.

Contaminantes principales

- Anhídrido sulfuroso.
- Monóxido de carbono.
- Oxidos de nitrógeno.
- Hidrocarburos.
- Polvos (partículas sedimentables y partículas en suspensión).
- Humos

Contaminantes especiales

Derivados del azufre:

- Anhídrido sulfúrico
- Nieblas de ácido sulfúrico
- Acido sulfhídrico.
- Sulfuro de carbono.
- Cloruros de azufre.

Derivados del nitrógeno:

- Amoníacos y sus derivados.
- Acido nítrico.
- Cianógeno.
- Acido cianhídrico.
- Cianuros.

Halógenos y sus derivados:

- Fluor.
- Cloro.
- Bromo.
- Yodo.
- Acido fluorhídrico.
- Acido clorhídrico.
- Acido bromhídrico.
- Acido yodhídrico.
- Acido fluosilícico.
- Fluoruros.
- Oxícloruro de carbono o fosgeno.

Otros compuestos inorgánicos:

- Arsénico y sus derivados.

Compuestos orgánicos:

- Acetileno.
- Aldehidos.
- Aminas.
- Anhídrido y ácido maleico.
- Anhídrido y ácido acético.
- Acido fumárico.
- Anhídrido y ácido ftálico.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA:	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./266.		
	2	TEMA:	CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	16	CAPITULO:	LEGISLACION DE APLICACION	01	10	80

- Compuestos orgánicos volátiles del azufre (mercaptanos otros).
- Compuestos orgánicos del cloro.
- Compuestos orgánicos del plomo.
- Piridina y metilpiridinas (picolinas).

Partículas sólidas:

- Partículas no metálicas conteniendo fósforo, arsénico, antimonio, silicio, selenio, cloro y sus compuestos.
- Partículas de metales pesados conteniendo cinc, cadmio, plomo, cobre, mercurio, aluminio, hierro, manganeso, cromo, molibdeno, wolframio, titanio, vanadio y sus compuestos.
- Partículas de metales ligeros conteniendo sodio, potasio, calcio, magnesio, berilio y sus compuestos.
- Partículas de sustancias minerales (asbestos).

Aerosoles:

- Aerosoles procedentes de las plantas de benceno.
- Aerosoles procedentes de las plantas de alquitrán.

Varios:

- Olores molestos.
- Partículas radioactivas.

16.3.2. Niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera para las principales actividades industriales potencialmente contaminadoras de la atmósfera.

1. Centrales térmicas.

1.1. Centrales Térmicas de carbón.

Emisión de partículas sólidas.

	Niveles de emisión — mg/Nm ³				
	Instalaciones existentes		Instalaciones nuevas		Previsión 1980
	(a)	(a)	(b)	(a)	(b)
Potencia: 50 MW.....	750	500	400	250	250
Entre 50 y 200 MW.....	500	350	300	200	200
200 MW.....	350	200	200	150	150

- (a) Zona higiénicamente aceptable.
- (b) Zona de atmósfera contaminada.

Las Centrales Térmicas que se vean precisadas a quemar carbones de baja calidad, con muy alto contenido en azufre (superior al 1,5 por 100) o en cenizas (superior al 20 por 100), deberán cumplir unos niveles de emisión específicos que en cada caso serán determinados por el Ministerio de Industria.

Opacidad.

No se superará el número 1 de la Escala de Ringelmann (equivalente a un 20 por 100 de opacidad límite). Este índice podrá alcanzar valores no superiores a 2 de la Escala de

Ringelmann en periodos de dos minutos cada hora. Durante el periodo de encendido (estimado como máximo en tres horas) no se sobrepasará el valor de 3 de la Escala de Ringelmann, obtenida como media de cuatro determinaciones escalonadas a partir de quince minutos del comienzo del mismo.

Emisión de SO₂

Para cualquier potencia y tanto para instalaciones existentes como nuevas: 2.400 mg/Nm³ para las Centrales que quemen hulla o antracita. Para las que emplean lignitos, el límite de emisión máximo será de 9.000 mg/Nm³.

1.2. Centrales Térmicas de fuel-oil.

Emisión de partículas sólidas.

	Niveles de emisión — mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Potencia: < 50 MW.....	250	200	175
Entre 50 y 200 MW.....	200	175	150
> 200 MW.....	175	150	120

Opacidad.

No se superará el número 1 de la Escala de Ringelmann. Este índice podrá alcanzar valores no superiores a 2 de la Escala de Ringelmann en periodos de dos minutos cada hora.

Emissiones de SO₂

	Niveles de emisión		
	mg/Nm ³		
	Instalaciones nuevas y existentes	Previsión 1977	Previsión 1980
Para cualquier potencia....	5.500	4.500	3.000

1.3. Centrales Nucleares.

Se aplicarán las disposiciones específicas.

2. Instalaciones de combustión industrial (excepto centrales térmicas).

2.1. Instalaciones que utilizan carbón.

Emission de partículas sólidas.

	Niveles de emisión		
	mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Potencia: Inferior a 500 – b/h.....	500	350	250
Potencia: Igual o superior a 500 thrh.....	400	250	150

(1-h = termia = 1.000 Kcal).

Opacidad.

No se superará el número 1 de la Escala de Ringelmann o el número 2 de la Escala de Bacharach. Este índice podrá alcanzar valores no superiores a 2 de la Escala Ringelmann y 4 de la Escala de Bacharach, en periodos de dos minutos cada hora. Durante el periodo de encendido (estimado como máximo en dos horas) no se sobrepasará el valor 3 de la Escala de Ringelmann o el 6 de la de Bacharach, obtenido como media de cuatro determinaciones escalonadas a partir de quince minutos del comienzo del mismo.

Emission de SO₂

Para cualquier potencia y tanto para instalaciones existentes como nuevas: 2.400 mg/Nm³ para las instalaciones que quemen hulla o antracita. Para las que empleen lignitos, el límite de emisión máximo será de 6.000 mg/Nm³.

2.2. Instalaciones que utilizan fuel-oil.

Opacidad.

Los índices de ennegrecimiento para cualquier potencia no deberán sobrepasar los valores que a continuación se indican, salvo tres periodos inferiores a diez minutos cada día.

	Escala Bacharach	Escala Ringelmann
Instalaciones que utilicen gas-oil o fuel-oil doméstico.....	5	1
Instalaciones que utilicen fuel-oil pesado número 1 o BIA (bajo índice de azufre).....	4	2
Instalaciones que utilicen fuel-oil pesado número 2.....	5	2,5

	Niveles de emisión		
	mg/m ³ . N		
	Instalaciones nuevas y existentes	Previsión 1977	Previsión 1980
Emission de SO₂			
Instalaciones que emplean gas-oil, doméstico a fuel-oil BIA (bajo índice de azufre).....	1.700	1.700	850
Instalaciones que emplean fuel-oil pesado número 1.	4.200	2.500	1.700
Instalaciones que emplean fuel-oil pesado número 2.	6.800	5.000	3.400

Emission de monóxido de carbono.

El contenido en CO en los gases de combustión, para cualquier potencia y combustible, no será superior a 1.445 ppm., que equivale a dos gramos termia o $4,8 \times 10^{-10}$ Kg/Jouie.

3. Incineradores de residuos sólidos.

	Niveles de emisión					
	mg/m ³ . N (1)					
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980			
Emission de partículas sólidas.						
Capacidad.....	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
Hasta una Tm/h de residuos	800	450	700	350	500	250
Entre una y tres Tm/h.....	600	300	500	250	400	200
Entre tres Tm/h y siete Tm/h						
horas residuos.....	450	225	400	200	300	150
Entre 7 y 15 Tm/h residuos.	150	175	300	150	250	150
15 Tm/h de residuos.....	250	150	250	150	150	120

- (a) Zona higiénicamente aceptable.
- (b) Zona de atmósfera contaminada.

(1) Con un exceso de aire corregido para corresponder a un contenido de CO₂ del 10 por 100.

Opacidad de humos.

La opacidad de los humos no excederá el 20 por 100, que equivale a no rebasar el valor número 1 de la Escala de Ringelmann. Este índice podrá alcanzar valores no superiores dos (40 por 100 de opacidad) de la Escala de Ringelmann en períodos de tres minutos cada hora.

4. Siderurgia.

4.1. Preparación y aglomeración de minerales.

Niveles de emisión
mg/m³ . N

Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
--------------------------	----------------------	----------------

Emisiones de partículas sólidas.

Aglomeración de minerales (sinterización y pelletización).....

400 250 150

Preparación del carbón (mollienda, etcetera).....

200 150 120

En las operaciones de aglomeración de minerales, en instalaciones nuevas se permitirá alcanzar niveles de emisión de hasta 500 mg/m³N durante períodos breves que no sobrepasen un máximo de 200 h/año.

Recomendaciones:

- Disminuir la altura de caída en las operaciones de carga y descarga.
- Proteger las cintas transportadoras de la acción del viento.
- Prever instalaciones de rociado de agua, incluso utilizando productos que aumenten la tensión superficial.

4.2. Baterías de coque e instalaciones de recuperación de subproductos.

Niveles de emisión
mg/m³N

Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
--------------------------	----------------------	----------------

Emisión de partículas sólidas.....

200 150 150

Emisión SO₂.....

1.000 500 500

Emisión de H₂S.....

2.500 2.000 2.000

Opacidad de humos.

La opacidad de los humos no excederá el 30 por 100, que equivale a no rebasar el valor 1,5 de la Escala de Ringelmann. Este índice podrá alcanzar valores no superiores a 2,5 (50 por 100 de opacidad) de la Escala de Ringelmann en períodos de diez minutos cada hora en la carga y quince minutos cada hora durante la descarga.

El encendido de las antorchas de barrilete deberá ser automático y se conducirán los gases de antorchas bajas a antorchas altas.

4.3. Fabricación de Arrabio (Horno Alto).

Niveles de emisión
mg/m³N

Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
--------------------------	----------------------	----------------

Emisión de partículas sólidas 200 100 100

Emisión de SO₂

Se aplicarán los mismos niveles que en las instalaciones de combustión industriales.

Nota.—El gas de horno alto que no se utilice como combustible y sea necesario lanzarlo al exterior, se quemará en una o varias antorchas diseñadas para quemar un volumen-punta de gas de alto horno.

4.4. Fabricación de acero.

Convertidores de oxígeno.

(Acerías Ld. Kaldo y similares.)

Niveles de emisión (1)
mg/Nm³

Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
--------------------------	----------------------	----------------

Emisión de partículas sólidas 250 150 120

(1) Valores medios de un ciclo completo.

4.5. Acerías hornos eléctricos de arco.

Niveles de emisión (1)
mg/Nm³

Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
--------------------------	----------------------	----------------

Emisión de partículas sólidas (humos rojos):

Hornos de capacidad menor de cinco toneladas métricas.....

500 350 250

Hornos de capacidad mayor de cinco toneladas métricas.....

200 150 120

(1) Valores medios de un ciclo completo.

4.6. Acerías Martín Siemens.

	Niveles de emisión		
	mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de partículas sólidas.....	200	150	120

Estos límites deberán aplicarse a las Acerías Martín, que no tengan previsto su desmantelamiento en un plazo inferior a siete años.

4.7. Fundiciones Cubilotes.

	Niveles de emisión		
	mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emissiones de partículas sólidas.			
— Cubilotes mayores de una tonelada métrica/hora y hasta cinco tons./hora...	800	600	250
— Cubilotes mayores de cinco tons. métricas/hora...	600	300	150

4.8. Hornos de recalentamiento y tratamientos térmicos. Opacidad.

La opacidad de los hornos no excederá en 30 por 100, que equivale a no reasar el valor 1.5 de la Escala de Rigelmann.

4.9. Instalaciones siderúrgicas en general.

Las emisiones de SO₂ en cualquier instalación siderúrgica se ajustarán a lo prescrito al respecto para las instalaciones de combustión industriales.

5. Metalurgia no férrea.

	Niveles de emisión		
	Kg/Tm Al		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
5.1. Aluminio			
Obtención por reducción de alúmina.			
Emissiones de partículas sólidas.....	12	9	3.5
Emission de SO ₂	3	6	3
Emission de fluor. ácido, fluorhídrico y fluoruros (gas y partículas) (medida en F).....	3.6	1.2	1.0

Niveles de emisión
mg/Nm³

	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
	Aluminio de 2.ª fusión.		
Emission de partículas sólidas.....	200	150	100

Niveles de emisión
mg/Nm³

	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
	5.2. Cobre.		
Emission de partículas sólidas.			
Fusión de cobre.....	400	300	150
Refino del cobre.....	600	500	300
Hidrometalurgia.....	600	500	300
Emission de SO ₂	5.700	2.850	1.500
Emission de HCl.....	500	300	300

Niveles de emisión
mg/Nm³

	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
	5.3. Plomo.		
Emission de partículas sólidas.			
Cualquier proceso, excepto hornos cuba.....	200	150	50
Hornos de cuba (refino)....	300	200	100
Emission de plomo y sales de plomo (en Pb).			
Plantas pequeñas y medianas (volumen de emisión menor de 300 m ³ /min.)..	120	100	80
Plantas grandes (volumen de emisión superior a 300 m ³ /min.).....	20	15	10

Niveles de emisión
mg/Nm³

	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
	5.4. Cinc.		
Emission de partículas sólidas.....	600	200	50

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA:	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 3.2./279.		
	2	TEMA:	CONTAMINACION ATMOSFERICA	F E C H A		
E.O.I. MINER	16	CAPITULO:	LEGISLACION DE APLICACION	01	10	80

6. Ferroaleaciones.

	Niveles de emisión Kg/Tm de producto		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de partículas sólidas.			
Ferro-silicio.....	23	15	10
Ferro-silicio-cromo.....	30	20	15
Ferro-cromo refinado.....	8	5	5
Ferro-silicio-manganeso.....	0,5	0,5	0,3
Ferro-molibdeno.....	5	3	3
Emisión de HF.			
Ferro-molibdeno.....	2	1	1

7. Refinerías de petróleo.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de partículas sólidas.			
Calderas y hornos.....	180	150	120
Regeneración de catalizadores de las unidades de cracking catalítico.....	100	50	50

Opacidad.

La opacidad no será superior al 20 por 100 o al número 1 de la escala de Ringelmann, excepto en periodos de tres minutos cada hora y con una tolerancia del 2 por 100 del tiempo durante el año.

Emisión de CO.

Regeneración de catalizadores.....	500 ppm.
Otras unidades.....	1.500 ppm.

	mg/Nm ³		
Emisión de H ₂ S			
Cualquier proceso.....	10	7,5	5
Emisión de SO ₂			
Calderas y hornos.....	5.900	5.000	4.200
Otras instalaciones.....	3.400	3.400	2.500
Emisión máxima diaria (1) Tm/día.....	7 × C (1) 5 × C (1)		20 (1)

C = Capacidad a nivel de tratamiento de crudo en millones de Tm.

Emisiones de hidrocarburos procedentes de tanques de almacenamiento.

Deberán evitarse las pérdidas de hidrocarburos volátiles de los tanques de almacenamiento, para lo cual éstos se dotarán de techos flotantes o de sistemas de recuperación de los vapores.

8. Fabricación de cal.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de partículas sólidas.....			
	500	250	150
Trituradores, molinos, desleidores de cal, transportadores, silos, carga y descarga, etc.			
Emisión de partículas sólidas.....			
	500	250	150

9. Cementos

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de polvos.			
Hornos de cemento.....	400 (1)	250 (1)	150 (1)
Enfriadores de clinker.....	170	100	50
Machacadoras molinos, transportadores y ensacadoras.....	300	250	150

(1) Se admitirá una tolerancia de 1.000 mg/Nm³ durante cuarenta y ocho horas consecutivas. Las instalaciones de depuración no podrán funcionar incorrectamente más de 200 h/año.

Opacidad.

Se admitirá una opacidad del 10 por 100 como máximo en todas las fuentes.

10. Cerámica.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de polvos.....			
	500	250	150

11. Vidrio y fibras minerales.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de polvos.....	300	200	150

12. Plantas de aglomerados asfálticos.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Secadores rotativos, elevadores de material caliente, cribas, tolvas mezcladoras.			
Emisión de partículas sólidas:			
Plantas asfálticas situadas a menos de 500 metros de zona habitada.....	400	250	100
Plantas asfálticas situadas a dos kilómetros por lo menos de edificaciones o actividades que puedan ser molestadas por las emisiones de las mismas. Dichas plantas pueden permanecer en el mismo sitio dos años por lo menos.....	800	500	200

Opacidad.

Ninguna descarga tendrá una opacidad de más de un Ringelmann.

13. Fabricación de ácido sulfúrico.

13.1. Método de cámaras de plomo.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de SO ₂	5.600	4.275	—
Nieblas de H ₂ SO ₄	615	500	—
NO _x	3.000	1.000	—
13.2 Método de contacto.			
SO ₂	8.550	2.850	1.425
Nieblas de H ₂ SO ₄	500	300	150

14. Fabricación de ácido nítrico.

	Niveles de emisión Kg/Tm ácido producido		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emissiones de NO _x (1).....	20	3	1,5

(1) Valor medido como promedio de dos horas y ácido producido expresado en toneladas equivalentes a ácido nítrico 100 por 100.

Opacidad.

Las emisiones a la atmósfera deben ser incoloras.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emissiones de NO _x , como NO ₂	3.200	410	205
Emissiones de NO _x , como NO.....	2.000	292	146

15. Fabricación de fertilizantes.

15.1. Fertilizantes orgánicos

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emissiones de partículas sólidas.			
Incinerador de residuos....	250	150	120

Opacidad.

La opacidad de los humos del incinerador no será superior al 20 por 100, que equivale a no sobrepasar el número 1 de la Escala de Ringelmann salvo periodos de tres minutos cada hora, en que se podrá llegar hasta una opacidad del 40 por 100 o número 2 del Ringelmann.

15.2. Fertilizantes inorgánicos.

15.2.1. Nitrogenados.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emissiones de partículas sólidas.....	250	150	150

15.2.2. Fosfatos

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de partículas sólidas.....	250	150	150
Kg F/Tm P2 O5			
Emisión de fluor. ácido fluorhídrico y fluoruros.			
Superfosfatos simples.....	0.4	0.07	0.07
Trifosfatos triples.....	0.3	0.05	0.05

16. Fabricación de carburo de calcio.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de partículas sólidas.			
Instalaciones de preparación	300	150	150
Horno.....	500	350	250

17. Fabricación de negro de humo.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de partículas sólidas.....	150	100	60

18. Fabricación de alúmina.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de partículas sólidas.....	—	150	50

19. Fabricación de cloro.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de cloro.....	230	200	150

20. Fabricación de carbonato de sosa (sosa Solvay).

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de cloro.....	460	300	200

21. Fabricación de arsénico.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de AS ₃ O ₃			
Volumen inferior a 2.500 l/seg.	120	80	60
Volumen superior a 2.500 l/seg.	45	30	20

22. Fabricación de antimonio.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de Sb ₂ O ₃			
Volumen inferior a 2.500 l/seg.	120	80	60
Volumen superior a 2.500 l/seg.	45	30	20

23. Fabricación de cadmio.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emisión de Cadmio.....	40	25	17

Nota: El volumen total emitido podrá exceder de 13,6 kilogramos por 168 horas semanales.

24. Fabricación de pasta de papel.

24.1. Pasta al bisulfito.

	Niveles de emisión		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emissiones de SO ₂ (Kg/Tm pasta).....	20	10	5
Emissiones de partículas sólidas.....			
(Combustión de lejías) (mg/Nm ³).....	500	250	150

24.2. Pasta al sulfato o kraft.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Hornos de recuperación de lejías.			
Emissiones de partículas sólidas.....	500	250	150
Emissiones de H ₂ S.....	10 (1)	10 (2)	7,5

(1) Valor medio en un periodo de ocho minutos. Este valor no debe ser rebasado durante más del 10 por 100 del tiempo de funcionamiento mensual.

(2) Valor medio en un periodo de ocho minutos. Este valor no debe ser rebasado durante más del 5 por 100 del tiempo de funcionamiento mensual.

25. Fabricación de viscosa y otros procesos que emitan ácido sulfhídrico.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	Instalaciones existentes	Instalaciones nuevas	Previsión 1980
Emissiones de H ₂ S.....	10	10	7,5

26. Incineración de lodos procedentes de las estaciones de depuración de aguas residuales.

La emisión de partículas sólidas no podrá ser superior a 0,65 kilogramos de lodo seco.

La opacidad de los humos no superará el número 1 de la Escala de Ringelmann.

27. Actividades industriales diversas no especificadas en este anexo.

	Unidad de medida	Niveles de emisión
Contaminantes:		
Partículas sólidas.....	mg/Nm ³	150
SO ₂	mg/Nm ³	4.300
CO.....	p.p.m.	500
NO ₂ (medio como NO ₂).....	p.p.m.	300.
F total.....	mg/Nm ³	250
Cl.....	mg/Nm ³	230
H Cl.....	mg/Nm ³	460
SH ₂	mg/Nm ³	10

Opacidad:

El índice de ennegrecimiento no será superior al número 1 de la Escala de Ringelmann o al número 2 de la Escala de Bacharach, que equivale al 20 por 100 de opacidad.

Manual de Ingeniería Ambiental	2	AREA :	INGENIERIA AMBIENTAL	HOJA 2.2./274..		
	2	TEMA :	CONTAMINACION ATMOSFERICA	FECHA		
E.O.I. MINER	17	CAPITULO :	BIBLIOGRAFIA	01	10	80

- ARTHUR C. STERN : "Air Pollution"(1) - Academic Press N. Y.
- "Industrial Ventilation" - American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- J.A. DANIELSON : "Air Pollution Engineering Manual.
- LORA-MIRO : "Técnicas de Defensa del Medio Ambiente", - Labor S.A.

(1) El "Air Pollution" se compone de tres volúmenes en su 2ª edición inglesa:

VOLUMEN I

- Parte I Air Pollution
- Parte II Air Pollution Meteorology
- Parte III Effects of Air Pollution

VOLUMEN II

- Parte IV Analysis of Pollutants
- Parte V Air Quality and Meteorological Monitoring
- Parte VI Source Measurement and Community Survey

VOLUMEN III

- Parte VII Sources of Air Pollution
- Parte VIII Control Methods and Equipment
- Parte IX Air Pollution Control



01728
