

57
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**CONTAMINACION ATMOSFERICA
-EVALUACION Y CONTROL-**

RAFAEL DE JESUS CARBAJAL GALINDO

I N G E N I E R I A Q U I M I C A

M O N O G R A F I A

- 1975 -



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CLAS. Tesis
ADQ. 1975
FECHA
PROC. MT-57



QUIM. 06

A MI MADRE
SRA. ESTHER GALINDO DE C.

A MI HERMANO
FRANCISCO CARBAJAL G.

A MIS ABUELOS
FRANCISCO GALINDO E. (q.e.p.d.)
MARGARITA RIVERA VDA. DE G.

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA:

PRESIDENTE:	DR. RAMON VILCHIS ZIMBRON
VOCAL:	ING JORGE MENCARINI PENICHE
SECRETARIO:	ING. RAMON ARNAUD HUERTA
1er. SUPLENTE:	DR. VICTOR M. CORONADO BRAVO
2o. SUPLENTE:	ING. ALBERTO DE LA FUENTE ZUNO

SITIO DONDE SE DESARROLLA EL TEMA:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA
S.S.A. SUBSECRETARIA DE MEJORAMIENTO DEL AMBIENTE
DIRECCION GENERAL DE PLANEACION

SUSTENTANTE:

RAFAEL DE JESUS CARBAJAL GALINDO

ASESOR:

ING. RAMON ARNAUD HUERTA

INDICE

I.—INTRODUCCION	8
II.— PROGRAMA DE INVESTIGACION PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA	16
— Causas de la contaminación atmosférica	
— Naturaleza de la contaminación atmosférica	
— Areas donde se presenta el problema	
— Actividades e investigaciones	
— Composición y clasificación de los contaminantes atmosféricos	
— Evaluaciones de los problemas	
— Control de la contaminación atmosférica	
— Eliminación de cloro de una corriente gaseosa	
— Eliminación de partículas	
— Monitoreo	
— Control de la emisión de vehículos por medio de un método catalítico.	
— Dioxido de azufre	
III.— EFECTOS DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA EN EL HOMBRE	31
— Mecanismo de protección	
— El ojo	
— El sistema respiratorio	
IV.— METEOROLOGIA	40
— Elementos individuales del clima	
— Otros elementos del clima	
— Clima y comportamiento de la pluma	
— Dispersión atmosférica	
V.— SISTEMAS Y PROGRAMAS DE CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA	59
— Control de la contaminación por cambio en el proceso	
— Control de la contaminación por eliminación	
— Ciclones	
— Lavadores	
— Filtros	

- Precipitadores electrostáticos
- Eliminación de contaminantes gaseosos y olores
- Absorción
- Adsorción
- Combustión
- Combustión Catalítica
- Enmascaramiento y neutralización de olores
- Dispersión

VI.— CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA EN LA INDUSTRIA QUIMICA

107

- Métodos centrales de control
- Acido sulfúrico
- Acido nítrico
- Acido fosfórico
- Acido fluorhídrico
- Acido clorhídrico
- Dióxido de azufre
- Oxidos de nitrógeno
- Cloro
- Materia particulada
- Compuestos organicos
- Sólidos y breas
- Líquidos
- Gases y vapores
- Olores

VII.— EQUIPOS DE CONTROL PARA LA CONTAMINACION ATMOSFERICA

131

- Naturaleza
- Origen
- Información primaria para diseñar el equipo
- Técnica para analizar el tamaño de partícula
- Analisis de polvos, humos y materia particulada
- Determinación de los contaminantes
- Determinación del volumen y de la densidad de gas
- Propósito del equipo de control
- Filtros

- Ciclones
- Camaras de sedimentación
- Separadores inerciales
- Precipitadores electrostáticos
- Colectores humedos
- Torres de rocío
- Torres empacadas
- Lavadores

VIII.— CONCLUSIONES

148

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO I
INTRODUCCION

Súbitamente, el hombre contemporáneo se ha tenido que enfrentar a un fenómeno ecológico que amenaza transformar radicalmente la historia universal.

De pronto, se ha dado cuenta, quizá por los efectos acusados, de que el ambiente en el que vive, crece y se desarrolla, se está contaminando en forma verdaderamente alarmente. Entonces, el hombre ha tenido que preocuparse por esta amenaza y se ha visto en la necesidad de analizar las causas del posible desastre y de programar técnicamente, los medios para disminuir, contener y erradicar los motivos de la contaminación ambiental.

La atmósfera también actúa como soporte y como agente de transporte de elementos que, voluntaria o involuntariamente pueden introducirse en ella. El aire es naturalmente portador de diversos gases, puede cargarse de gases en suspensión salidos de la transformación química industrial, debidos a la combustión incompleta de productos carbonos extraídos de las reservas geológicas de rocas carbonatadas, o gases salidos de la combinación o de la disociación molecular de los elementos constitutivos de hidrocarburos líquidos o gaseosos tras las operaciones de extracción, refinado, utilización. Los gases o las partículas sólidas finas pueden ser captadas en suspensión en el vapor de agua contenido en el aire, concentrándose hasta límites críticos para las especies vivientes y para el hombre. El aire, puede así mismo, cargarse de partículas sólidas muy finas, muy ligeras, que siguen sus desplazamientos.

El efecto climático de la turbulencia del aire es el viento, factor esencial del ambiente a escala regional y local. El viento es un desplazamiento de masas de aire pudiendo ser éste, frío o caliente, seco o húmedo. Según la importancia de las diferencias de presión, y según la intensidad de los movimientos en remolino, el viento es más o menos violento, más o menos duradero, más o menos frecuente. Pone en movimiento los productos y materias en suspensión, en caso de ser violento, es erosivo, cargándose de elementos, es por lo tanto, el factor principal de transporte de suspensiones químicas en el aire. A la inversa, puede favorecer la dispersión de concentraciones de productos ligeros que se acumulan en el aire en calma o están cautivos en la condensación de la niebla, peso que son barridos por el aire en movimiento. Según los casos y lugares, el viento puede contribuir a la convergencia o a la divergencia de las suspensiones.

El aire de las regiones industriales y urbanas está cargado de impurezas que son los subproductos o los desechos ligeros de la industria (húmos) y de las formas de vida y de circulación (calefacción doméstica y urbana, tratamientos de las basuras domésticas, gases de escape de los automóviles y de todos los motores de combustión interna). Estos subproductos son consecuencia de una imperfecta combustión de carbón y cada vez más, de los hidrocarburos líquidos y gaseosos. Las cantidades de productos tóxicos en suspensión en la atmósfera son impresionantes, aunque no se haya alcanzado niveles verdaderamente peligrosos.

En el pasado, las poblaciones de las grandes ciudades se renovaban constantemente gracias al flujo de gentes venidas del campo. Sin embargo, más adelante, los hombres nacen, viven y se reproducen en medios ambientes urbanos e industriales. Esta situación no tiene precedente biológico. Probablemente va a crear nuevos caracteres en el cuerpo y en la natalidad del hombre. Aquí, lo importante es que los peores efectos patológicos de los elementos de contaminación del medio ambiente no se detecta en el momento de su acción, sino que su efecto se pone en evidencia varios decenios más tarde.

Con la idea de que esto puede conducirnos a acciones concretas y eficaces sobre cada motivo de contaminación, debemos analizar a composición de una atmósfera urbana e industrial en términos de toxicidad y relacionar cada uno de estos elementos con un tipo de agresión característica en relación al organismo humano. Esta actitud es verdaderamente útil, pero, en cierto modo, abstracta, porque la nocividad de los elementos de contaminación es, en gran parte, un fenómeno acumulativo y porque algunos peligros, y no los menores, son consecuencia de reacciones que se producen en el aire debidas a la presencia simultánea de elementos de distintas procedencias y que entran en la composición de nuevos productos que, incluso en pequeñas cantidades, son más terribles que cada uno de sus componentes.

Las principales materias primas de la contaminación atmosférica son los gases sulfurosos (Principalmente el bióxido de azufre), monóxido de carbono, el dióxido de carbono, los aldehídos, óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos gaseosos, liberados por la combustión incompleta de hidrocarburos líquidos. La industria química añade

a estas materias ácido nítrico, fluoruros y diversas sales minerales. La gasolina de los automóviles contiene especialmente sales de plomo, que son expulsados en el momento de la combustión. Las fábricas de cemento inundan sus alrededores de polvos de silicatos. Las principales reacciones químicas peligrosas que se efectúan bajo determinadas condiciones en la atmósfera son la transformación de bióxido de azufre, que al hidratarse, produce ácido sulfúrico (smog ácido), la concentración del ozono, la oxidación del óxido nítrico y la producción de productos complejos.

Es casi seguro que, en las grandes ciudades, la frecuencia y generalización del asma y de la bronquitis crónica se relacionan con la difusión del gas sulfuroso, que el nitrato de perácido provoca la irritación de las mucosas oculares y perturbaciones de la visión, y que los óxidos de carbono influyen en la sangre. Se cree que el cáncer en las vías respiratorias está favorecido por la respiración del aire que contiene algunos hidrocarburos policíclicos, como el naftoperileno o el benzopireno, presentes en los gases de escape. Sin embargo, la investigación analítica sólo da una imagen parcial de la realidad. El organismo se ve atacado simultáneamente por varios factores y las acciones agresivas se combinan y refuerzan unas a otras originando un efecto sinérgico. Las irritaciones provocadas por el ozono y por los ácidos abren camino a infecciones. Los gases no son tan sólo peligrosos por sí mismos, sino que roen los tejidos y los hacen más vulnerables a las infecciones de microbios y de virus. Además, la atmósfera urbana es un medio propicio para la proliferación y transmisión bacteriana y vírica. En particular, se señala que en el aire de los túneles del metro abundan estafilococos, estreptococos, enterobacterias, etc. El contenido de esta flora de los subsuelos y de los medios acondicionados urbanos varía según las estaciones del año, lo que explica y mantiene las epidemias periódicas.

El ataque al organismo humano por los contaminantes contenidos en la atmósfera se efectúa disimuladamente mientras no se rebasan los niveles críticos, y antes ya hemos señalado que, según algunos autores, sus efectos sólo se conocerán a largo plazo, bajo la forma de generalización de nuevas afecciones crónicas y, quizá, de mutaciones genéticas, deformaciones hereditarias, etc. Pero cuando se sobrepasan los límites críticos, la nocividad se manifiesta inme-

diatamente: casos mortales, hospitalizaciones en masa, interrupción del trabajo por gran número de personas y pánico general. Hay dos tipos de causas, específicamente distintas, que pueden originar este rebasamiento: los accidentes ocurridos en instalaciones industriales que provocan la emanación de productos tóxicos en cantidades inusitadas, acumulaciones o concentraciones de productos en suspensión en el aire por circunstancias excepcionales de circulación del aire a ras del suelo, es decir, por determinada situación del tiempo o del clima local. Es preciso destacar de antemano que determinadas posiciones geográficas favorecen una serie de acumulaciones incidentales que pueden sobrepasar la cantidad que el organismo tolera normalmente. A partir del funcionamiento de las primeras fábricas y de las primeras estaciones ferroviarias, es de todos sabido que distritos urbanos enteros cayeron en la permanente desgracia de ser barridos casi constantemente por vientos cargados de humaredas: el East End de Londres principalmente, ensombrecido al mismo tiempo por los humos de los barcos navegando por el puerto, por las emanaciones de las fábricas y de las centrales térmicas y por la masa de aire cargada de hollín salido de los hogares de la ciudad. Cualquier ciudad sometida a un régimen de vientos dominantes tiene sus barrios de cara al viento, aguas abajo de las fábricas en relación con la dirección de los vientos más frecuentes (vientos de componente oeste en Europa occidental), y sus barrios luminosos, aguas arriba de las zonas industriales. De ello surge a menudo un reparto cualitativo de los suelos y de los barrios urbanos, reparto también condicionado por la topografía.

En efecto, a nivel del suelo la circulación del aire viene condicionada por el relieve, y en menor escala, por la misma distribución de las casas, que actúa como un microrrelieve local. Pueden considerarse dos situaciones, que corresponden cada una a una escala distinta: la de efecto cubeta y la de alvéolo. La topografía de cubeta es a menudo la de las grandes aglomeraciones urbanas de Europa, puesto que, antes del desarrollo industrial se prestaba al establecimiento de ciudades-encrucijada en la confluencia de valles en cuencas interiores, en fondos de estuarios protegidos, aptos para organizar un puerto: París, Burdeos, Londres, Amberes. En países de clima suave y húmedo, estos fondos de cubeta son trampas de niebla, cuya condensación puede verse acelerada por la suspensión de polvo en el

aire húmedo y por modificaciones en la estratificación térmica de las capas bajas de la atmósfera, por los aportes de humo y de aire caliente de las fábricas y de la calefacción de los inmuebles. Ciertos tipos de clima que provocan una inversión térmica y estancamiento del aire a ras del suelo y hasta 100 ó 200 m por encima de él, son particularmente propicios para la acumulación de elementos de contaminación en una atmósfera que no se mueve ni se renueva durante días o semanas. En tales circunstancias se puede producir una situación crítica. Dentro de un espacio urbanizado, la distribución de los microrelieves naturales (colinas, replieguez de vertientes) y de las construcciones, pueden producir alvéolos, esto es, huecos de algunas decenas o centenares de metros de anchura entre vertientes o entre bloques de inmuebles, que actúan a su vez como medios cerrados. En ellos el aire desciende y se inmoviliza formando remolinos estacionarios; los productos de contaminación arrojados por los talleres o por los tubos de escape de los coches no se disipan y pueden enriquecerse por el reflujo de aire enturbiado que franquea incidentalmente el borde del alvéolo. Puntos críticos todos ellos, tanto más, por cuanto suele agradecerse ingenuamente la calma de la atmósfera y el resguardo contra los vientos fríos.

Los actuales urbanistas tienen en cuenta estas observaciones; recomiendan que los barrios de viviendas se construyan en lugares bien barridos por los vientos del campo y que las zonas industriales se edifiquen más abajo de los espacios urbanizados y que de tal modo, que los productos tóxicos no se acumulen. Pero su estricta aplicación puede provocar una drástica modificación en la escala de los valores inmobiliarios, contra la que gravitan una serie de intereses. Además, no se puede pensar que en un plazo más o menos corto se reconstruyan las ciudades fuera de las zonas topográficas reconocidas como favorables a la concentración de todos los venenos urbanos. Y, no obstante, ciertos accidentes graves han proporcionado serios golpes a los valores inmobiliarios de reputados barrios por estar particularmente expuestos a la contaminación. Principalmente en los Angeles, donde el smog, cada vez más frecuente a consecuencia de la intensificación de la circulación de automóviles, ha provocado desplazamientos de población en el interior de la ciudad, cuyos barrios

más contaminados han sido abandonados a las categorías sociales menos favorecidas.

De entre los casos críticos en que los límites han sido sobrepasados ampliamente, recordemos la niebla mortal de Lieja en 1930, que ocasionó al menos un centenar de muertes en pocos días; la niebla de Donora, cerca de Pittsburgh, que en 1948 ocasionó varias decenas de muertes y obligó a varios centenares de personas a interrumpir su trabajo durante varios días; la niebla de Londres, en 1952, a la que se atribuyen 4,000 muertes suplementarias (en relación con la media anual de fallecimientos).

Especialmente en Londres, después de estos incidentes se tomaron medidas preventivas controlando más estrechamente las humaredas industriales, sustituyendo los sistemas de calefacción doméstica de combustión incompetente por instalaciones que absorben y eliminan mejor los subproductos de la calefacción. Pero el peligro permanece, debido al aumento de las actividades y de las formas de circulación susceptibles de cargar la atmósfera. Queda todavía la solución de elegir lugares apropiados para construir las nuevas ciudades y estructurarlas de acuerdo con las circulaciones locales del aire en las capas más bajas de la atmósfera.

Como agente transmisor, la atmósfera comporta también otros perjuicios, más o menos inmediatamente nocivos: infección por las acumulaciones de los desechos en fermentación, transmisión de malos olores, transmisión del ruido. Las ciudades modernas corren el peligro de verse invadidas por las sobras de la vida doméstica, sobras que se reparten en tres categorías: desechos orgánicos putrescibles, desechos combustibles y desechos indestructibles. Evidentemente, los desechos combustibles son lo que se pueden destruir con mayor facilidad e incluso, en algunos casos, se han podido recuperar pequeñas cantidades de energía térmica y eléctrica partiendo de la incineración de las basuras domésticas. Los desechos orgánicos en su mayoría combustibles, si están durante cierto tiempo expuestos al aire libre presentan el inconveniente de producir fermentaciones, de convertirse en medios bacterianos y de atraer insectos y roedores susceptibles de transportar gérmenes de enfermedades. Los desechos indestructibles —vidrio, chatarra, materias plásticas— resultan cada vez más

embarazosos. Una familia urbana americana o europea se deshace diariamente de unos 10 Kg. de desperdicios; o sea, para una ciudad de un millón de habitantes, 3,000 toneladas de desechos diarios, sin contar con los desperdicios mecánicos, aparatos caseros, coches viejos, recipientes metálicos, latas de aceite y de gasolina, etc., que representan una cantidad considerable de toneladas: para una ciudad de igual dimensión, los coches convertidos en chatarra en un año representan un estacionamiento de casi 100,000 vehículos. La acumulación plantea problemas de uso del espacio y de estética del marco urbano, si bien hasta el momento no ha afectado el contenido y la salubridad del aire. Los peligros de infección por parte de los desperdicios putrescibles son de otro tipo: a menudo se asocian a otro perjuicio del medio urbano: los olores. Estos pueden ser desagradables sin ser tóxicos, tóxicos y desagradables, o tóxicos sin ser desagradables o, incluso, sin ser perceptibles. Estamos ahora frente a una dualidad en la jerarquía de las incomodidades y de los perjuicios.

C A P I T U L O I I

PROGRAMAS DE INVESTIGACION PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.

Causas de la contaminación atmosférica.—

Las complejidades toxicológicas y físicas de la contaminación atmosférica se han definido pobremente hasta ahora. Los problemas que causan la contaminación atmosférica involucra emisiones gaseosas y mezclas de gases y/o materiales de muchos tipos de partículas, de simples o múltiples orígenes. Prácticamente, cada actividad sobre la superficie de la tierra, humana o de otra forma en el mundo actual, contaminan de alguna manera el ambiente de la tierra. Frecuentemente este punto se enfoca hacia la industria como principal culpable en la contaminación ambiental, con respecto a los verdaderos orígenes de la contaminación.

Naturaleza de la contaminación atmosférica.—

El aire es la capa gaseosa que rodea al planeta tierra. Esta capa está formada de un número de constituyentes básicos gaseosos, de los cuales los más abundantes son el nitrógeno (78%) y el oxígeno (21%). El resto de la atmósfera terrestre está constituida de otros gases tales como argón, neón, helio, criptón, xenón, hidrogeno, vapor de agua, dióxido de carbono y ozono.

El dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, amoníaco y dióxido de carbono, se deben considerar más bien como contaminantes que como constituyentes del aire normal, dado que generalmente sus orígenes son industriales. Existen muchos otros elementos en el aire tales como metano, formaldehído y partículas suspendidas.

El aire que se respira es invisible, inodoro e insípido. Esto es esencialmente respecto a la vida humana y se consume en un promedio de 30 a 40 libras por día.

El aire que el hombre respira, ha estado siempre contaminado en algún grado, por una contaminación natural o hecha por el hombre, tales como polvo, humo, gases, neblinas, vapores y olores. Los primeros orígenes de la contaminación natural fueron debidos a terremotos, erupciones de volcanes, al polen de las plantas e incendios forestales, los cuales arrasaron muchas hectáreas de terreno, según aparece en la historia del hombre. El hombre produce desechos que manda al aire, prácticamente en cualquier cosa que hace por sobre-

vivir, tales como cocinar sus alimentos, calentar su casa, cultivando sus tierras, construyendo edificios, disponiendo de la basura y en su transportación.

La contaminación atmosférica puede ser definida como una mezcla de uno o más contaminantes de sólidos, líquidos o gases, descargados en el aire por naturaleza y/o por el hombre en tales cantidades y en tal duración que pueden ser o tender a ser dañinos a la vida humana, animal o vegetal, o pudiendo interferir con el bienestar de la vida misma. Los contaminantes atmosféricos pueden ser dispersados rápidamente en grandes cantidades en el aire o pueden acumularse en concentraciones variables, dependiendo de la topografía del área geográfica y de las condiciones meteorológicas existentes en el momento de la dispersión. Los contaminantes atmosféricos pueden ser definidos como una mezcla de una variedad de contaminantes, cambiando en forma y concentración, de tiempo a tiempo y de lugar a lugar.✕

Los problemas a que se enfrentan el científico y la población en general respecto a la contaminación atmosférica, involucran relaciones económicas y sociales, las cuales parecen ser las más difíciles de controlar.

Áreas donde se presenta el problema.

El problema de la contaminación atmosférica es básicamente regional, en base a varias razones: Primero, se sabe que la contaminación atmosférica no tiene límites, porque predominan corrientes de aire que pueden transportar contaminantes a grandes distancias de su origen. Segundo, la continua urbanización de los recursos que originan la contaminación, continuarán expandiéndose sobre grandes áreas geográficas. Porque la contaminación atmosférica es un problema regional, por tanto, la manera más efectiva de atacar el problema es en base de áreas.

Los factores meteorológicos tienen un papel principal en la determinación de niveles de contaminación atmosférica. Para una emisión de un contaminante dado, el nivel de concentración del contaminante resultante puede variar grandemente, dependiendo de las condiciones meteorológicas que prevalezcan en ese momento. Existen factores meteorológicos tales como frecuencia de ocurrencia, persis-

tencia, grandes variaciones de la estabilidad, leyes del aire y la frecuencia de varias velocidades del viento, los cuales afectan el transporte y la difusión de los contaminantes liberados en la atmosfera y por lo tanto influirán en la extensión geográfica.

Actividades e Investigaciones.—

Se han encontrado nuevas y mejores maneras para colectar el dióxido de azufre, el cual es uno de los que más contribuyen en la contaminación del aire. Se ha dado una considerable atención para usar bajas cantidades de azufre en combustibles. Dada la escasez de tales combustibles y del costo para reducir el contenido de azufre de los combustibles comunes, se deberá hacer una mayor aproximación práctica. La mayor aproximación, es el resultado en la eliminación del bióxido de azufre de los gases de salida de la chimenea. Algunos experimentos han tenido éxito en este sentido, por lo cual, los óxidos de azufre se eliminan de la chimenea por medio de técnicas sofisticadas de lavado y aprovechándolos para la información de ácido sulfúrico, el cual tiene valor en el mercado y puede ayudar a bajar el costo del proceso. Las áreas de investigación en la eliminación de dióxido de azufre de los gases de escape, incluye la absorción usando alúmina alcalizada u óxido de manganeso, la adsorción usando carbonos activados, y estudios menos frecuentes usando oxidación catalítica. Un estudio de absorción usa alúmina alcalizada a temperaturas elevadas superiores a 600°F, convirtiéndose entonces los óxidos a azufre elemental por la reducción del absorbente usado.

Técnicas de desulfurización de gases de escape que están en estudio y en algunos casos en uso:

- 1.— La coagulación acústica de la niebla de ácido sulfúrico en un campo de sonido con frecuencias óptimas de 16 a 22 kHz.
- 2.— Lavados en húmedo con amoníaco y se le adiciona ácido sulfúrico para convertir el sulfato ácido de amonio a sulfato de amonio y éste producto final se puede usar como un fertilizante.
- 3.— Caminos prácticos para la eliminación de óxidos de azufre y productos gaseosos finales de procesos de combustión con el propósito de una eliminación o conversión completa por medio de productos de un valor comercial.

Composición y clasificación de los contaminantes atmosféricos.—

Se ha ideado un proyecto de clasificación abarcando una variedad de contaminantes que se pueden presentar en la atmósfera. Los contaminantes pueden ser clasificados, por su origen, como un estado físico y por su composición química pudiendo existir en cualquiera de ellos una forma particular o gaseosa.

— En base a su origen, los contaminantes atmosféricos se clasifican como primarios y secundarios en calidad. Los contaminante primarios son aquellos que se emiten a la atmósfera como una consecuencia de un proceso. Este tipo de contaminantes existe en el aire en la misma forma en que se descargaron. Los contaminantes secundarios son los que se forman como productos de una reacción; generalmente, un contaminante existente reacciona con alguna otra sustancia en la atmósfera. Esta sustancia existente puede ser algún otro contaminante, o bien, puede ser una sustancia natural de la atmosfera.

§ En base a su estado físico, los contaminantes atmosféricos se clasifican como gaseosos o de partícula. Los contaminantes gaseosos están presentes en la atmósfera y se comportan similarmente al aire mismo. Una vez difusos, tales gases no se sedimentan. Ejemplos de contaminantes gaseosos son el dióxido de nitrógeno, óxido nítrico, dióxido de azufre, trióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido sulfúrico, ácido fluorhídrico, ácido clorhídrico, amoníaco, gases de hidrocarburos y olores. Esta lista puede no estar completa y podría contener cualquier otro constituyente gaseoso no considerados como componente normal del aire ambiente.

— Los contaminantes de tipo partícula incluyen polvos y cualquier tipo de humos, emanaciones, neblinas y aerosoles y están clasificados como sólidos o líquidos. Estos contaminantes están finamente divididos por lo general, y son dispersados fácilmente en la atmósfera. Las partículas de gran tamaño tienden a sedimentarse rápidamente. Las partículas de menor tamaño, sin embargo, pueden tender a actuar como un gas y permanecer en suspensión en el aire.

Generalmente hablando, cuando se mencionan las palabras de contaminación atmosférica, inmediatamente sabemos que tales contaminantes son nocivos. En la mayoría de los casos esto es cierto; sin embargo existen otros contaminantes, los cuales no son tóxicos por naturaleza. Ejemplos de tales contaminantes son los olores

de perfumes no tóxicos, y malos olores como los cadáveres de animales. —20—

agradables o perfumes. En algunos casos, los olores pueden ser o no tóxicos, pero si molestos, tal es el caso de los olores que despiden los cadáveres de los animales muertos en carretera

Evaluaciones del problema.—

Los problemas relacionados con los contaminantes gaseosos son muchos. Los procedimientos para la identificación de compuestos específicos que contribuyen a la contaminación atmosférica son muy tediosos y costosos y pocos laboratorios están equipados para hacer tales evaluaciones. La composición química y el estado físico en el cual ocurre la contaminación atmosférica tienen una importancia que va en aumento, especialmente cuando se refieren a la fisiología del aparato respiratorio. Existe una necesidad para mejorar los métodos analíticos para determinar la magnitud de la contaminación atmosférica, especialmente para los métodos menos sofisticados que podrían ser menos costosos que los que hay en la actualidad. Es necesario un gran espectro de mediciones analíticas para los compuestos complejos, incrementándolos en calidad y en cantidad. La historia de la tecnología nos indica que la composición de las emisiones y sus orígenes cambian rápidamente y que aumentará su cantidad en el futuro; desafortunadamente, la dirección en la cual ocurren tales cambios no pueden predecirse con precisión.

— Un origen significativo de la contaminación en áreas urbanas es el causado por las emisiones de los motores de los vehículos. La interrelación exacta entre los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno cuando se produce el smog fotoquímico en presencia de la luz solar necesita una clasificación adicional. —

La identificación de los contaminantes primarios y la determinación de la importancia relativa de cada uno en el proceso fotoquímico no solamente es necesario sino que se requiere. Nuestra cambiante tecnología necesita un estudio fundamental en fotoquímica. Una identificación de reactivos primarios asociada con tóxicos secundarios hará mayor el desarrollo de controles más efectivos y menos costosos. Un entendimiento completo y adecuado de los productos intermediarios y secundarios debe ser lo primero, antes de que sus efectos biológicos puedan ser analizados y comprendidos por completo.

La mayor información se debe obtener a partir de los efectos sinérgicos y de las relaciones entre los constituyentes del aire ambiente y aquellos aditivos extraños emitidos en la atmósfera.

Las estadísticas actuales sobre mortalidad no son lo suficientemente sensitivas por si mismas para reflejar la influencia de concentraciones por minuto de toxinas en la atmósfera. Una tasación de enfermedades debidas a la contaminación atmosférica requiere una gran sofisticación en la información mayor que la examinación física actual rutinaria. Las mediciones objetivas de los procesos fisiológicos y sus cambios se han llevado a cabo, sin embargo, es necesario hacer algo más.

Una relación causal entre la contaminación atmosférica y enfermedades crónicas, las cuales parecen incrementarse con incidencia en el país, no ha sido establecida por completo hasta la fecha. Ciertos descubrimientos aislados, indican que los ataques asmáticos, ocurren con mayor frecuencia en días en los cuales el smog está pesado y que los pacientes sufren de efisemas, mejorando al respirar aire filtrado después de haber estado expuestos al smog.-

Existe una necesidad definida para realizar avances utilizando técnicas analíticas y de laboratorio, métodos estáticos y un aproximamiento epidemiólogo con estudios meteorológicos, físicos y de ingeniería los cuales nos darán esperanza para una solución a la vasta complejidad de los problemas de la contaminación atmosférica. Esta es la conuinación de muchas disciplinas con las cuales resolveremos el problema, sin ser sólo un solo método con el cual lograremos dicho propósito.

Control de la contaminación atmosférica.—

Prescindiendo de que el problema de la contaminación atmosférica debe ser atacado, ya sea que éste sea un amplio problema de la comunidad o meramente un problema individual de origen, básicamente deberá ser controlado, esto es, controlar las emisiones del contaminante en su origen lo cual provocaría que no entre a la atmósfera. Otro método de control es por medio de la disolución natural del contaminante después de que éste se encuentra en la atmósfera a una concentración tal, que no perjudique al hombre, los animales, la vegetación o los materiales de construcción. Esto deberá tenerse en mente siempre, sin embargo, este método no elimina la contaminación solamente la diluye a niveles más aceptables.

Tal control de contaminante en su origen, puede lograrse por varios métodos: cambios en la materia prima, cambios operacionales,

modificación o reemplazamiento del equipo del proceso, adoptando métodos alternativos y una operación más eficiente del equipo en existencia.

Existen varios métodos básicos para reducir por completo o a niveles tolerables la contaminación atmosférica. Algunos de estos son por medio de la destrucción o enmascaramiento del contaminante y neutralización o colección del mismo.

La destrucción del contaminante puede ser por el uso de fuego y/o por el uso de quemadores catalíticos. Esos métodos por lo general están limitados a la destrucción de sólo aquellos desperdicios que son combustibles.

Este método no se recomienda para la destrucción de gases de salida que contengan elementos pesados de metales u óxidos de azufre.

Los contaminantes pueden ser enmascarados por superimposición de olores más agradables dentro del aire. Este método no elimina el contaminante pero origina un olor menos ofensivo a los sentidos. Esto no será cierto cuando están implicados olores tóxicos.

La neutralización del contaminante no es un buen acercamiento, porque no elimina el contaminante sino, que solamente cancela el olor por los efectos sinérgicos de dos olores cuando se combina uno con otro y cuando tal combinación llega a ser una neutralización específica por sus reacciones intermediarias.

La colección del contaminante es el método a escoger, y es el método más ampliamente usado para abatir la contaminación atmosférica. Este método consiste en atrapar el contaminante por medio de un equipo colector, así se previene que éste escape a la atmosfera. Eliminación de cloro de una corriente gaseosa.-

Se está desarrollando un programa en el cual una reacción química libera cerca de 12.5 lb/hr de cloro. Si esta instalación comercial tuviera un éxito completo, el cloro podría ser recuperado y recirculado hasta su agotamiento, pero esta recirculación no es la deseable a tales niveles de operación.

La cantidad de gas total que se maneja es aproximadamente 137 ft³/hr, el cual consiste principalmente de nitrógeno y oxígeno;

el balance es cloro. El cloro es eliminado recurriendo a un lavado en dos etapas. La primera etapa consiste en un tanque agitado que contiene una solución caústica (hidróxido de sodio) y la segunda etapa es una pequeña torre empacada. El lavador caústico, es similar en principio a los usados para la preparación de hipoclorito de sodio. La eliminación de cloro difiere del proceso de hipoclorito en que (1) la solución caústica que se usa está más concentrada y (2) que el cloro se mezcla con otros gases.

La primera etapa consiste en un tanque apropiado para manejar 125 galones equipado con un agitador y un ducto de salida. El gas al ser lavado se admite por medio de una inmersión; éste es burbujado dentro de la solución vigorosamente agitada, después pasa a la corriente de salida para ser alimentado a una torre empacada en la cual se elimina el cloro residual. El caústico se prepara por dilución en agua, 50 galones de líquido caústico al 25% (aproximadamente 50% de sosa). Esto teóricamente nos da el suficiente caústico para eliminar el cloro durante aproximadamente de $5\frac{1}{2}$ horas de operación, pero la experiencia actual de operación ha demostrado que solo funciona de $3\frac{1}{2}$ a 4 horas. La solución caústica puede causar que esto hierva fuera del lavador, dando como resultado una pérdida de solución y una posible liberación de cloro libre.

El uso de caústico en mayores concentraciones puede incrementar la capacidad del lavador, pero se ha encontrado que a esta concentración del caústico hay una seria reducción en la eficiencia de la eliminación del cloro acompañada de una gran concentración de cloro en el gas fuera del agitador. Ya sea que esto sea debido a la inestabilidad de la solución de hipoclorito a las altas concentraciones de caústico, a la reducción en la velocidad de reacción entre el cloro y el caústico, o a algún otra causa no establecida, pero el problema se ha eliminado por la dilución del caústico como se describió anteriormente. Se ha instalado un circuito de enfriamiento en el lavador para eliminar el calor de dilución del caústico y también para disipar el calor de reacción entre el cloro y el caústico. Este calor de reacción se ha estimado como de 625 Btu/lb de cloro; así que el circuito deberá eliminar alrededor de 31500 Btu/hr no es una gran cantidad de calor pero si no se elimina resulta que el aumento de temperatura podría reducir la eficiencia en la eliminación de cloro. Esto podría llegar a ser un problema serio si el caústico hierve.

Los gases que provienen del lavador caústico ha tenido mayor porción de cloro eliminado. Esos gases son los que se alimentan a la segunda etapa del lavado, la torre empacada. Esta consiste de una sección de 8 pulgadas de diámetro y 4 pies de largo, empacadas con anillos de 3/4 de pulgada de polipropileno. La torre tiene un flujo continuo de 3 galones de agua por minuto a la temperatura ambiente. No hay detección de olor de cloro en el gas de salida y la eficiencia de eliminación es muy grande.

Un segundo método, con menos aceptación para abatir la contaminación atmosférica es por medio de la dilución del contaminante en la atmósfera antes de que éste alcance concentraciones que sean perjudiciales. Tal método de control podría incluir el uso de chimeneas, diseñadas para la descarga a alturas suficientemente altas para seguir el movimiento natural que las corrientes de aire y diluyan y dispersen los contaminantes de tal manera que no puedan ser perjudiciales cuando caigan a tierra. Este método no elimina el contaminante; y solo reduce la concentración por unidad de volumen, y es aplicable para emisiones de partícula y emisiones gaseosas.

El control meteorológico de las operaciones de proceso consiste en un control que implica restricciones o cesaciones de las operaciones de manufactura durante períodos en los cuales las condiciones meteorológicas son adversas. Tales controles deben ser puestos en marcha tan pronto como aparezcan dichas condiciones meteorológicas adversas.

Eliminación de partículas.

El abatimiento de la contaminación de partículas, se puede llevar a cabo por varios métodos tales como la fijación por gravedad, la filtración, la atracción electrostática y el acondicionamiento de la partícula. Esto, tan bueno y eficiente como lo es la filtración, no significa que se elimine el 100% de todas las partículas; pero desafortunadamente, una pequeña porción de la cantidad total de las partículas, especialmente las más pequeñas, logran entrar al aire ambiente.

El improvisamiento de las características de diseño tenderá a incrementar más adelante, las capacidades en existencia, especialmente en sistemas que empleen filtros y lavadores de agua.

Monitoreo.-

El monitoreo en la atmósfera para contaminantes gaseosos y de partículas pueden realizarse por medio de varias técnicas. La selección de la técnica adecuada dependerá de la necesidad del investigador, de el tipo de contaminante con el que se va a experimentar y del tipo de análisis a ejecutar. Los programas de monitoreo se establecen para asegurar que los requerimientos establecidos por el gobierno federal, estatal o local se mantengan, y para evaluar las condiciones peligrosas en potencia las cuales pueden perjudicar o poner en peligro la vida o los bienes de la persona. El monitoreo puede ser hecho en base a tiempo continuo o en intervalos, dependiendo del tipo de información que se desee.

Los efectos de larga duración de la contaminación atmosférica sobre el hombre, sobre otros sistemas biológicos y sobre sus propiedades deben ser cuantizados correctamente para determinar la necesidad, posibilidad y economía de las mediciones de control diseñadas para abatir dichos efectos. Las investigaciones hechas hasta ahora encuentran todavía obstáculos por la falta de técnicas que sean lo suficientemente susceptibles para detectar los cambios más mínimos. Para determinar los niveles de los contaminantes atmosféricos de los cuales se esperan efectos biológicos, es necesario la investigación extensa de toxicología, farmacología y fisiología.

Aunque se han logrado algunos progresos en la identificación y medición de algunas clases generales de contaminantes existe la necesidad de intensificar la investigación de los métodos para la identificación y medición de esas clases de contaminantes. Es necesario, también, una intensificación en la investigación de métodos para la identificación y medición de las sustancias individuales que componen dicha clase de contaminante. Los procedimientos más simples y menos costosos serán los requeridos para este propósito. Nuestro conocimiento está todavía lejos de ser completo con respecto a los contaminantes atmosféricos; su identidad, sus orígenes específicos de los cuales se derivan, los factores que gobiernan su dispersión y los cambios físicos y químicos en la atmósfera, sus efectos individuales, en combinación y también sinérgicos.

Se han recogido muchos tipos de datos y son muchos más los que se necesitan para actuar con precisión. Algunas situaciones serias provienen por la falta de personal adecuado y adiestrado para efectuar el monitoreo. En muchos casos, los programas estatales y locales no existen o bien son inadecuados. El trabajo técnico enfocado hacia la evaluación del problema y al desarrollo de soluciones se encuentra en un nivel por debajo del que se requiere para mantener un nivel aceptable de la calidad de aire.

Los programas de monitoreo son de suma importancia en la determinación de los niveles existentes de contaminación en la atmósfera, teniendo una importancia similar, la capacidad para llevar a cabo dicho monitoreo con exactitud. Existen demasiados tipos diferentes de procedimientos analíticos, los cuales están basados en una suposición y no en un hecho.

Monitoreo de contaminantes de partícula.—

Quedan incluidos en este renglón los granos de polen, fungosidades, esporas, óxidos metálicos, polvos, cenizas, humos, nieblas y vapores.

La investigación rutinaria y los análisis de las partículas atmosféricas que existen en el aire ambiente, por lo general se llevan a cabo con la ayuda de ciertos equipos. En ciertos casos, se pueden coleccionar las partículas muestreadas en medio líquido o sobre una superficie engrasada al incidir dichas partículas. El tipo de muestreador de partícula más apropiado es aquel que colecciona grandes volúmenes sobre un papel filtro o por un muestreador de cinta en donde se pasa una cantidad de aire conocida a través de un medio filtrante sobre el cual se coleccionan las partículas y que posteriormente es pesado. En el caso del muestreador de cinta, se hace pasar una fuente luminosa a través del material depositado y la reducción en la transmisión de la luz a través de la mancha, determina la cantidad de sólidos depositados sobre el filtro por medio de un mecanismo de iluminación.

Las muestras de lluvia radiactiva son por lo general indicadores de la concentración de partículas. Este tipo de muestreador puede darnos respuestas erróneas dado que no hay manera de determinar si se perdieron algunas partículas o volaron durante el tiempo de muestreo. Este tipo de muestreo se lleva a cabo mes a mes básicamente.

Una prueba sobre una área muy pequeña se considera representativa de un gran segmento de una comunidad geográfica. Un muestreo en un período corto no nos da la suficiente prueba como para que sea lo suficientemente útil en la detección de los períodos de máxima deposición.

Otros tipos de muestreadores de partícula son los de mecanismos inerciales y los precipitadores electrostáticos y térmicos.

Monitoreo de contaminantes gaseosos.

Existen numerosos materiales que han sido usados para absorber contaminantes atmosféricos gaseosos. Algunos de éstos son partículas de carbón, carbón activado, gel de sílice, alúmina activado y materiales sintéticos de alta porosidad tales como los aluminosilicatos de sodio o de calcio de alta porosidad. Otros métodos de colección son por medio del congelamiento o condensamiento del material colectado. En este método una muestra de aire se hace pasar a través de una cámara de enfriamiento intensivo, colectándose entonces, los contaminantes condensables. La cámara se enfría por medio de inmersión en un líquido de baja temperatura como lo es el nitrógeno líquido o el aire líquido.

Este método de colección no es muy confiable, por lo cual la eficiencia de este método se deberá determinar con exactitud.

La toma de muestras se usa en casos donde no se dispone de electricidad ni laboratorios. Este tipo de muestreo es útil para cuando las concentraciones del contaminante varían considerablemente durante un tiempo determinado y se desea tener una muestra en un tiempo específico. El tomar muestras tiene una seria limitación, la muestra que se obtiene no es lo suficientemente grande como para detectar pequeñas cantidades de materiales, excepto cuando se usan técnicas más sensitivas.

* Control de la emisión de vehículos por medio de un método catalítico.

Los experimentos que se llevan a cabo para investigar el uso de catalizadores son para controlar las emisiones de los motores de vehículos, que incluye el control de las emisiones de automóviles y el control de las emisiones olorosas provenientes del diesel.

Los experimentos de esta naturaleza se llevan a cabo considerando la compatibilidad de los catalizadores con sistemas de manejo y con los requisitos necesarios de los equipos apropiados.

Los catalizadores dependen de algunas variables tales como el contenido metálico, el tipo, la composición y la estructura física. Los catalizadores deben de ser capaces de resistir la intemperie. La capacidad de estos agentes, deben de probarse simulando las condiciones a que estarán sujetas en diversas circunstancias.

Se necesita un equipo especial para determinar y medir la calidad y cantidad de esos efluentes de salida de la máquina.

Equipo analítico.—

Los componentes de salida que interesan al control de la contaminación atmosférica son los hidrocarburos, el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno que se identifican y cuantifican por detección iónica a la flama y por análisis cromatográfico de gases. Otro análisis específico para medir el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno es por medio de oxido — reducciones y por detección ultravioleta.

Existen numerosos problemas en el análisis, en especial cuando se trata de cualificar o cuantificar los componentes de una muestra. El método a escoger debe seleccionarse en base a su exactitud, medibilidad, reproductibilidad consistente y su fácil manejo. Los análisis en húmedo se usan para medir compuestos tales como aldehidos y dióxido de azufre. Las muestras de gases que contienen esos componentes, se colectan en frascos apropiados para ser procesados posteriormente mediante técnicas estándares.

Las mediciones específicas se pueden hacer sobre los materiales catalíticos antes y después de tratarlos y usarlos. Son de particular interés los volúmenes porosos, las áreas superficiales y las acumulaciones de plomo.

Dióxido del Azufre.—

La combustión del carbón y aceite para generar energía es la principal fuente de emisiones de dióxido de azufre a la atmósfera. Como posible solución al problema de la contaminación debida al dióxi-

do de azufre se ha propuesto substituir el combustible por un combustible nuclear o bien desulfurizar el combustible. Otra alternativa es la de eliminar el dióxido de azufre del gas mismo. Algunos de los procesos para la desulfurización del combustible son los siguientes:

Proceso Reinluft.—

Consiste en un proceso térmico regenerable de adsorción.

Oxidación Catalítica.—

Se oxida el dióxido de azufre a trióxido de azufre usando catalizadores sólidos como el óxido de vanadio. Una característica de este proceso es la posibilidad de recuperar el ácido sulfúrico o el sulfato de amonio.

Inyección de dolomita.—

Consiste en inyectar directamente dolomita en polvo dentro de las calderas. Los sulfatos que así se forman no tienen valor comercial por lo que ésto es poco usado.

Alúmina Alcalinizada.—

Los óxidos metálicos reaccionan con el dióxido de azufre dentro del gas combustible. Los productos que se recuperan después de regenerar el óxido metálico pueden ser azufre, dióxido de azufre o ácido sulfúrico.

Procesos misceláneos. Otros procesos que se consideran para desulfurizar el gas combustible son el electrolítico, el lavado con solución de sulfato, el carbonato fundido, el electrocímico y el método de claus modificado.

CAPITULO III

EFFECTOS DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA EN EL HOMBRE

Los diversos contaminantes actúan sobre el cuerpo humano en forma dañina cuando su concentración es alta, o bien cuando la concentración es baja pero crónica. Los científicos que en las últimas décadas han buscado respuesta a cuáles son los efectos de éstos en el cuerpo humano, se han encontrado con una serie de problemas como son: la determinación exacta de ¿cuáles son los contaminantes que se presentan en un momento determinado? ¿en que concentración y combinado con qué otras sustancias, la hora del día o la estación del año en los diferentes grupos humanos o en las diferentes edades ¿se presentan los mismos efectos?

→ Otras complicaciones son sinérgicas, puesto que la acción del conjunto de los contaminantes es mucho más severa que la suma de los efectos individuales. Además, el hombre ciudadano como el animal con la mayor capacidad de adaptación, es posible que esté desarrollando resistencias al efecto de los contaminantes.

Aún así, se han hecho estudios clínicos, industriales y de laboratorio que han permitido grandes avances en este campo.

→ Algunos de los principales efectos son:

* La bronquitis, o inflamación de los bronquios ya sea aguda o crónica, los pulmones van a recibir partículas o gases que irritan los bronquios, cuyos posibles efectos pueden ser el incremento de producción de mucosa, la constricción de los alveolos pulmonares, disminución y/o pérdida funcional de las células destructoras de bacterias, cambios histológicos de las células que cubren las vías respiratorias, resultando todo lo anterior en que se dificulta la respiración, puesto que se aumenta la resistencia a la misma.

→ Otro posible efecto es el enfisema pulmonar que se caracteriza por la destrucción de las paredes del alveolo. Si la enfermedad progresa, el alveolo pierde su resistencia y eventualmente se desintegra sin poder regenerarse, disminuyéndose la capacidad de exhalar el bióxido de carbono proveniente de la sangre.

Se ha podido correlacionar, que a mayor contaminación ambiental la probabilidad de que se presenten ya sea bronquitis o enfisema se incrementa; incluso se ha estudiado que la contaminación incrementa, también las posibilidades de cáncer pulmonar que usualmente es mor-

tal, aunque no se puede decir que todos aquellos que respiren aire contaminado necesariamente serán víctimas de una de estas enfermedades.

Además de las manifestaciones patológicas broncopulmonares, una alta concentración de contaminantes hace que el corazón trabaje más intensamente para compensar las pérdidas de oxígeno debido a las infecciones pulmonares. El monóxido de carbono (CO) puede disminuir el contenido de oxígeno de la sangre que en casos extremos pueden intoxicar al cerebro y causar la muerte.

Otros efectos de menor importancia son la irritación del ojo, dolor de cabeza, mareos, visión borrosa y retraso en el desarrollo óseo.

La pregunta importante es: ¿qué tan dañinos pueden ser los contaminantes atmosféricos? y los posibles daños antes mencionados ¿que tan frecuentes son? No es que sea cotidiano, pero pienso que hablar de los episodios más agudos de contaminación atmosférica puede centrar al estudioso, en la amenaza que la contaminación presenta a la humanidad, como tributo de la misma a la industrialización.

El Valle de Mosa, Bélica, en diciembre de 1930 fue víctima de una inmovilización de la atmosfera producto de una inversión térmica, el gran número de industrias siderúrgicas, vidrieras, cementeras, y la presencia de calderas, emitieron tal cantidad de contaminantes que al tercer día de quedar éstos atrapados, los habitantes sufrieron lesiones en las vías respiratorias y 60 fallecieron. En octubre de 1948 en Donora, Pennsylvania, cerca de Pittsburgh, que es una zona intensamente industrializada, y en condiciones similares a las de Mosa, murieron 20 personas, o sea, una tasa de mortalidad 10 veces mayor al esperado y se incrementó la incidencia de lesiones de vías aéreas respiratorias.

En Londres del 5 al 9 de diciembre de 1952 un "smog" muy intenso cubrió el Valle del Tamesis, en especial en Londres durante 4 días con el trágico resultado de 4,000 muertes por enfermedades respiratorias y cardiovasculares y prácticamente toda la población sufrió dificultades respiratorias.

Finalmente, en Poza Rica, Ver., el 24 de noviembre de 1950, una planta tratadora de gas natural sufrió una ruptura en una tubería

de ácido sulfhídrico (H_2S) que tardó 25 minutos en repararse. La niebla e inversión térmica que existía sobre la ciudad en ese momento produjeron la muerte de 22 personas y 320 tuvieron que ser hospitalizadas.

En los cuatro casos antes estudiados las afecciones fueron broncopulmonares y cardiovasculares, no hubo lesiones en los órganos examinados, los enfermos, niños y ancianos resultaron especialmente afectados, y lo que es más importante, los contaminantes individualmente se encontraban en concentraciones inferiores a las que generalmente son consideradas tóxicas.

En el Valle de México, las inversiones térmicas nunca han durado más de unas horas, pero si llegará a suceder, la evidencia histórica nos enseña que habría asfixia, dolor y muerte. Permanente posibilidad, que es casi necesaria para que entendamos lo crítico del problema de la contaminación atmosférica, así fue en Londres y Pittsburgh que son ahora, ciudades prácticamente limpias.

- El daño que provoca un contaminante atmosférico en el hombre está supeditado a las características toxicológicas propias de la sustancia, a los niveles de concentración en que se encuentran y al tiempo que dura la exposición al mismo, así como a la susceptibilidad o resistencia del hombre expuesto. Los contaminantes de aire, gases o partículas, suman varios millares, pero cuando se trata específicamente de los que contaminan en gran escala al aire de las ciudades, se consideran solamente aquellos que son producto de una formación o emisión constante o masiva, como los subproductos de la combustión de energéticos fósiles o de procesos o actividades diversas, como son los industrias, y que de hecho pueden afectar a la población expuesta.

Bióxido de carbono (CO_2). Se estima que anualmente se emiten en la tierra, como subproducto de la combustión, 15.000 millones de toneladas de este contaminante, lo que origina que 0.6 ug/m^3 se estén adicionando a la atmósfera año con año a los niveles de concentración de 320 ug/m^3 que tenemos en la actualidad. Hemos de apuntar que el CO_2 resulta esencial para la vida de las plantas y que

el único daño que podría causar al hombre, resultaría indirecto si hemos de admitir su participación en la futura modificación del clima en el planeta.

→ Monóxido de carbono (CO). Resulta de la combustión incompleta de materias orgánicas y se estima que anualmente emiten en la tierra alrededor de 250 millones de toneladas de este contaminante, de las que más de la mitad la emiten los automoviles en operación. En el hombre, el hábito de fumar es un fuente importante de exposición y el CO reacciona con la hemoglobina y las hemoproteínas, reduciendo la capacidad de la sangre para conducir el oxígeno a todos los tejidos. Exposiciones a altas concentraciones de monóxido de carbono durante largo tiempo, pueden producir cambios estructurales en el corazón y el cerebro; 58 mg de CO, en un M³ de aire de 6 semanas de exposiciones, pueden lograrlo. Hay evidencia de que exposiciones como las señaladas, aumentan en algunos animales de laboratorio el depósito de lípidos en vasos sanguíneos, pudiendo explicarse con esto el origen de algunas arterioesclerosis. Resultan susceptibles a este contaminante los individuos con anemias, enfermos cardiovasculares con trastornos en la glándula tiroides y enfermedades pulmonares.

Anhidrido Sulforoso (SO₂). Se deriva principalmente de la combustión de energéticos fósiles que contienen azufre, estimándose anualmente en 150 millones de toneladas, la emisión global de este contaminante, que en combinación con partículas en suspensión como humos, contribuye al desarrollo y agrava algunas enfermedades respiratorias. Es irritante respiratorio y puede causar broncoconstricción y aumento de la resistencia al paso del aire en los pasajes aéreos. Se potencializa su acción con partículas que lo oxidan, algunas respuestas como broncoespasmos se han notado en exposición a concentraciones de una parte por millón. Aumenta la morbilidad de los padecimientos cardiovasculares en personas mayores de 55 años.

Las partículas en suspensión como humo. Producto de quemar combustibles, de incendios y de procesos industriales. Se estima anualmente para los humos, una emisión global de 20 millones de toneladas y considerando que químicamente puede tratarse de muchas sustancias, junto con el anhídrido sulfuroso, sus efectos a las vías respirato-

rias son mayores, de tipo irritativo o inflamatorio, reducen la luz solar y pueden también, indirectamente, originar reducciones de la temperatura de la superficie terrestre.

Oxidos de nitrógeno. NO_x . Productos de la oxidación del nitrógeno atmosférico se estima anualmente una emisión global de 53 millones de toneladas de este contaminante que, al combinarse con la mucosa en vías aéreas altas y en el pulmón, puede producir óxidos que irritan la estructura pulmonar y aumentar así, la producción de moco, o al reaccionar en los alvéolos pueden causar neumonías. Sin embargo, la información de efectos es escasa a los niveles de concentración registrados en la actualidad. Origina la bruma parda en el aire de las ciudades.

La irritación ocular que sufren algunas personas por la contaminación del aire, la originan los derivados de hidrocarburos como son la acroleína, los aldehídos y los oxidantes fotoquímicos, incluyendo el ozono que directa o indirectamente proviene de los escapes de vehículos automotores.

Finalmente, incluiremos el ruido como contaminante del aire. Este se produce en las industrias, en las ciudades y en las casas habitación, en centros de diversiones, etc. Resulta desagradable o perjudicial al hombre en cuanto puede interferir con la comunicación, el aprendizaje, el trabajo, el reposo, el sueño, la recuperación de la salud o la diversión, produce trastornos o alteraciones mentales y nerviosas, cardiocirculatorias, musculares y articulares e incluso llega a causar hipoacusias o sorderas.

* Mecanismos de protección.—

Con la colaboración de científicos y profesionistas se ha tratado de encontrar una relación entre la contaminación atmosférica y las enfermedades. Por lo tanto, se han identificado dos áreas principales sobre las cuales se atacará el problema: el ojo y el sistema respiratorio.

El Ojo.—

El ojo es sensitivo con ciertos contaminantes atmosféricos irritantes. Su capa externa, la conjuntiva y la córnea, tienen contacto directo con la atmósfera. La irritación del ojo puede resultar cuando la

conjuntiva y/o la córnea están en contacto con gases irritantes, partículas o partículas que transportan gases absorbidos. El mecanismo que limpia el ojo de materiales extraños es el lloriqueo o lagrimación.

Hasta ahora, la contaminación atmosférica no ha producido daños permanentes en los ojos.

El sistema Respiratorio.-

a) Función del sistema respiratorio.-

Una función del sistema respiratorio es el abastecimiento de oxígeno al sistema circulatorio. Además limpia el aire inspirado de las impurezas de bacterias, calienta el aire y lo humidifica. Todo esto se lleva a cabo mientras uno inspira y expira el aire. El dióxido de carbono pasa del sistema circulatorio al sistema respiratorio y se descarga cuando se expira el aire.

b) Anatomía y Mecanismos de Limpieza.-

1.— Sección nasofaringea.-

El sistema respiratorio puede dividirse en tres secciones principales. La primera es la sección nasofaringea. Sus partes principales son la cavidad nasal y la faringe. En esta sección se eliminan los contaminantes de partícula de un tamaño mayor a las 10 micras. Las partículas pueden ser inhaladas e inmediatamente ser exhaladas con la corriente de aire. Las partículas pueden quedar atrapadas en los vellos de la cavidad nasal y ser eliminadas al limpiar la nariz. Finalmente, las partículas pueden quedar sobre la superficie de la cavidad nasal o de la faringe. La superficie de estas partes del sistema respiratorio están cubiertas con una capa de mucosa. La mucosa fluye hacia la faringe, y las partículas se transportan con la mucosa, para después ser tragada o expectorada. Los contaminantes que son tragados pasan posteriormente al sistema gastrointestinal. La mucosa se mueve por medio de cilios. Estos son proyecciones muy diminutas (aproximadamente de 5 micras de largo por 0.2 micras de ancho) que parten de las células de la membrana de la mucosa en áreas específicas del sistema respiratorio. Los gases relativamente insolubles pueden llegar a ser absorbidos o adsorbidos dentro de la mucosa, pudiendo ser eliminados del cuerpo con la mucosa. Ciertos gases pueden llegar a causar irritación a la membrana de la mucosa, cuando éstos se ponen en contacto directo con

la mucosa. Esto puede tener como consecuencia un incremento en la producción de mucosa con lo cual se ayuda a diluir y limpiar la substancia atacada, o tener dificultades respiratorias.

2.- Ductos Respiratorios.-

La siguiente sección del sistema respiratorio a la cual entra el aire, está formada por un grupo de ductos respiratorios. Estos conducen el aire de la faringe a el pulmón. La limpieza de estos conductos respiratorios de los contaminantes de partícula y de los contaminantes gaseosos depende de la mucosa que forra esta sección. Aquí, como en la región nasofaríngea, los cilios mueven la mucosa hacia la faringe, donde ésta es tragada o expectorada. Los cilios no se encuentran más allá de los bronquiolos. Cuando la mucosa llega a ser 4 a 5 veces más gruesa que el largo del cilio, puede interrumpirse el flujo de la mucosa.

3.- Pulmón.-

La parte final del sistema respiratorio es el pulmón. Está compuesto de pequeños tubos llamados bronquiolos respiratorios que son ramificaciones de los bronquiolos terminales, al ramificarse aún más llegan a ser los ductos alveolares que terminan en los sacos alveolares que contienen los alveolos pulmonares. Los alveolos son sacos muy diminutos que contienen gran cantidad de vasos capilares. Aquí, el oxígeno entra en la corriente sanguínea y se libera dióxido de carbono hacia el sistema respiratorio donde se elimina y se calcula que el número de alveolos es de varios cientos de millones y el movimiento del gas se efectúa por difusión.

Las partículas menores de 10 micras, potencialmente pueden penetrar hasta las áreas más profundas del pulmón. Sin embargo, aquellas partículas de un diámetro menor de una micra son las que al parecer no pueden ser retenidas. Una partícula se puede eliminar de el pulmón al ser transportado por la mucosa a partir del bronquiolo terminal; la relación y eficiencia de seto, depende del número de partículas que se encuentre en el pulmón en ese momento. Si no ocurre esta eliminación, la partícula puede penetrar hasta la membrana alveolar, a donde la recoge los fluidos del cuerpo antes de llegar a los vasos capilares que rodean a los alveolos. El fluido del cuerpo puede transportar la partícula hacia un ganglio linfático, el cual actúa en algunas ocasiones como un filtro y atrapa a la partícula. Dicha partícula puede

penetrar también dentro de los vasos capilares, en cuyo caso, pudiera haber una reacción en los tejidos del pulmón que aislaría la partícula y posteriormente sería eliminada. Existen células que engullen las partículas y las transportan a través del alveolo, éstas reciben el nombre de fagocitos. Los fagocitos pueden transportar la partícula hacia la mucosa o a través de la membrana alveolar. Aquí puede entrar a la corriente sanguínea o transportarse hacia un ganglio linfático para su posterior eliminación en ambos casos.

Algunos contaminantes gaseosos que llegan a penetrar en el pulmón no reaccionan bajo las condiciones existentes, eliminándose al respirar. Otros gases pueden ser suficientemente reactivos y estar en una concentración tal que después permanecer durante un largo período, lleguen a irritar los tejidos del pulmón. Dichos gases pueden llegar a penetrar dentro de la circulación sanguínea, circulando a través de todo el cuerpo, en cuyo caso, los gases se eliminarán en el pulmón, en el riñón o bien en el intestino, pudiendo ser eliminado el gas al neutralizarlo por medio de alguna acción propia del cuerpo o en última instancia, depositarse sobre un punto determinado dentro del cuerpo donde pudiera causar algún efecto posterior.

c.- Implicaciones Cardíacas.-

El sistema cardiocirculatorio no actúa efectivamente en la eliminación de materiales extraños. Desafortunadamente, ciertos contaminantes producen ciertos efectos sobre el cuerpo antes de ser eliminados y como el sistema respiratorio y el sistema cardiocirculatorios están íntimamente ligados, cualquier problema en el sistema respiratorio, afectará potencialmente al segundo.

d.- Conclusión.-

El estudio de los efectos de la contaminación atmosférica en el hombre es muy complejo, debido al número tan grande de contaminantes que existen en nuestros tiempos y solo se han hecho estudios en pequeña escala.

CAPITULO IV
METEOROLOGIA

La metereología es la ciencia de la atmósfera. De acuerdo a una definición reciente, ésta no sólo incluye la física, sino que también historia, la química, la geología y la biología de la atmósfera al igual que su aplicación hacia ciertos campos, tales como la agricultura, la arquitectura, la industria, etc., y también ciencias periféricas, tales como la oceanografía, la biología, etc. El clima es el estado del aire o de la atmósfera con respecto al calor o al frío, a lo húmedo o a lo seco, a la calma o a la tormenta, a lo despejado o a lo nublado o a cualquier otro fenómeno meteorológico. Los meteorologistas consideran a la atmósfera como a un medio en el cual ocurren procesos físicos que afectan al clima, como un transportador de sustancias químicas, geológicas y biológicas y como un depósito en el cual se llevan a cabo ciertos número de procesos geofísicos, químicos y biológicos (tales como rayos cósmicos, interacciones químicas en el aire, crecimiento de las plantas, etc.) Cada uno de esos aspectos de la atmósfera (medio, transportador y depósito) son significativos al considerar la contaminación atmosférica.

La meteorología sinóptica, es la rama de la meteorología que trata del pronóstico del clima, en base principalmente, a las mediciones simultáneas de observación de ciertos elementos del clima sobre grandes áreas. Los problemas locales de la contaminación atmosférica, implican las escalas de pequeños espacios, los cuales se caracterizan mesometeorológicamente y micrometeorológicamente. En algunas circunstancias, se necesitan las mediciones auxiliares de los elementos climatológicos sobre la escala más pequeña, por ejemplo, en el sitio inmediato de un problema de contaminación atmosférica o con un trabajo neto de espaciamiento de unos cuantos kilómetros.

La climatología es la parte del campo de la meteorología que trata del "estado colectivo de la atmósfera" para un lugar dentro de un intervalo de tiempo específico. El estado de la atmósfera es el conjunto de los elementos individuales del clima, por ejemplo, la velocidad del viento, el gradiente térmico, etc., las cuales componen el clima.

La climatología física es la rama de la climatología que trata de analizar los datos y los resume. Los estados particulares de la atmósfera, tales como, el gradiente térmico, la dirección del viento, etc., durante un experimento individual de campo, están referidos

más bien como meteorológicos que como condiciones climatológicas. Las dominios de la climatología física y la meteorología experimental empiezan a trasladarse siempre y cuando los datos pertenezcan a experimentos individuales y sean agrupados juntos para su interpretación. Influencia de los factores meteorológicos en la contaminación atmosférica.

La contaminación atmosférica en una localidad, sin tomar en cuenta a fondo el nivel de contaminación de las masas de aire que llegan; es una función de las actividades de la comunidad y de las condiciones del clima, ambas son funciones del tiempo, por ejemplo, el tráfico de automóviles en las ciudades tiene una variación diurna muy marcada mientras que el calentamiento doméstico tiene una variación anual en adición a una variación diurna. Las variaciones diurnas y anuales de ciertos elementos del clima, por ejemplo, la velocidad del viento y el gradiente térmico; son no menos importantes en la consideración de los problemas de contaminación atmosférica. También son funciones de localización, las actividades de la comunidad y las condiciones del clima, por ejemplo, el tráfico de automóviles puede estar concentrado en áreas pobladas; y las fuentes para algunos contaminantes atmosféricos pueden estar confinadas, solamente en pocos lugares dentro de una comunidad. Los elementos climatológicos pueden variar también con la localización, con predominio a la altura, pero también con la horizontabilidad, especialmente en la topografía de una llanura. Así la velocidad del viento, generalmente aumenta y la dirección del viento por lo general cambia con la altura; y el gradiente térmico de los suburbios por la noche puede ser diferente de una manera significativa.

La importancia relativa de los elementos del clima o grupos de elementos tales como la velocidad del viento junto con el gradiente térmico, varían con el problema en cuestión. El sitio o localidad a cual se refiere un estado promedio de tales elementos, puede ser una pequeña mancha que represente una caseta de vigilancia al borde de una propiedad factorial, una comunidad suburbana o una metrópoli. El período de interés puede ser al mediodía, alguna de las estaciones o mayor tiempo. Más no deberá sorprendernos si se altera el uso de las mediciones en los cambios de los elementos del clima, o bien la magnitud del área considerada.

Algunas limitaciones en el tratamiento de la metereología en el estudio de la contaminación atmosférica, deberán seguir siendo mencionadas. Asimismo se enfatizará sobre el comportamiento de los elementos del clima en altitudes inferiores a los 1,500 metros. El transporte y dispersión de los contaminantes atmosféricos de orígenes discretos cerca de la tierra y de las chimeneas, están discutidos sin intentar relatar las contribuciones de un complejo de tales orígenes a la concentración de contaminantes resultante. Se consideran como contaminantes a aquellos gases o suspensiones de partículas con velocidades insignificantes de caída libre, sin especificación de su carácter físico o químico. El tratamiento de dispersión de contaminantes está limitado generalmente a viajar unos cuantos kilómetros a partir de su origen. Se dice poco, acerca de la gran escala de la circulación atmosférica, direcciones climatológicas y de otras materias interesantes.

Elementos individuales del clima.

Viento.

La dirección del viento se define como la dirección de la que el viento sopla. A la dirección hacia la cual está soplando el viento se le denomina viento abajo. Debido a la variación de la dirección y velocidad del viento, tanto los valores de cierto lugar particular y de tiempo, representan por lo general cierto tipo de promedio. Por ejemplo, las mediciones del viento más comunes del trabajo neto sinóptico son de 1 o 5 minutos en promedio. Los datos de la velocidad del viento se aprovechan también en algunas ocasiones, en la forma de número de kilómetros de aire en movimiento dentro de un período de tiempo de 24 horas. La dirección del viento se mide, por lo común, a partir del norte geográfico, dividido en 16 puntos del compás, cada dirección del viento cubre un sector angular de 22.5 grados. Un viento del este, significa que la dirección promedio durante el lapso de medición está dentro del sector 78.75—101.25 grados, medidos a partir del norte geográfico.

El término de viento abajo se refiere por lo general, a los períodos de tiempo durante un día más y nos dice la dirección que con más frecuencia tuvo durante dicho período; este término no nos dice nada acerca de las frecuencias relativas de las otras direcciones, excepto

si ninguna fue más frecuente que la dirección prevalente. Cuando hay calma no podrá medirse el viento horizontal ya que no existe movimientos, indicándose en este caso con un valor arbitrario pues la velocidad del viento es menor, por ejemplo, menores que 0.8 Km/h; en último caso y en algunas ocasiones, queda especificada la dirección del viento. El vector suma de un viento horizontal medido a intervalos en un lugar determinado para cierto período será el viento resultante.

Debido a ciertos vientos que se desvían, el viento resultante, para un período apacible, podrá considerarse como cero. Debido a esto, durante las condiciones cercanas a la calma, la dirección del viento varía con frecuencia, en especial en los terrenos ásperos, donde la ruta que lleva un contaminante atmosférico a partir de un origen continuo pero discreto, puede ser bastante irregular; en tales casos, el concepto puede ser bastante irregular, en tales casos, el concepto de viento abajo puede suprimirse. Una rosa de los vientos indica para una determinada estación y para un período de tiempo dado la ocurrencia, o el porcentaje de los vientos cada hora (en algunas ocasiones 6 o 12 veces cada hora) que llegan de 8 o 16 puntos del compás, junto con la ocurrencia de calma; para cada dirección, la distribución de velocidades por medio de intervalos de clase se encuentra ya especificada. Esta información puede estar dada en forma tabular o gráfica.

Los cambios en la dirección del viento si se efectúan en el sentido de las manecillas del reloj se les llama positivas; y si varían en sentido contrario a las manecillas del reloj se les denomina negativas. El promedio de los vientos tiende a variar a diferentes alturas de la tierra. En regiones menores a los 1,500 m. de altura, este incremento se expresa con frecuencia por medio de una ley de potencia, con la relación de dos anemómetros grandes, igual a la relación de velocidades correspondientes, partiendo de una potencia entre 0 y 1. Debido a la variación del viento con la altura, puede ser significativa la especificación de la altura del anemómetro y de la veleta al igual que la relación de la altura de un contaminante en el período de difusión.

Un sistema para especificar las velocidades del viento a partir de efectos visibles, llamado escala Beaufort para viento, fue expresada en sus orígenes en términos de la experiencia náutica. Para usarla en tierra, se ha desarrollado una modificación de aquella.

La advección se refiere al transporte horizontal de una porción de aire en la superficie o en el aire. Cuando el aire que llega es más caliente o más frío que el que se mueve afuera, se usan los términos de advección caliente o fría.

La turbulencia o la fluctuación en el viento de corta duración, medida en segundos o minutos, parte principalmente de la fricción mecánica debida a las irregularidades del terreno o de las corrientes de convección debidas al calentamiento solar o a la advección fría. El grado relativo de turbulencia puede estimarse a partir de un examen de los datos del viento continuo con un anemómetro expuesto y de una veleta. El rango de valores de la dirección o velocidad en un intervalo corto de tiempo que pueden ser de unos cuantos minutos o una hora, es un buen índice del grado de turbulencia, pero la resonancia del aspa puede hacer cambiar dichos valores.

Un viento cortante se refiere a la relación vectorial del cambio de la velocidad del viento (rapidez y dirección) con la distancia, ya sea horizontal o vertical. La diferencia en las velocidades del viento a dos alturas diferentes cercanas a la tierra, da por lo general un buen índice del vector del corte de viento para ese rango de alturas. El esfuerzo cortante se refiere a la fuerza tangencial que existe entre una capa de aire en movimiento relativo con respecto a otra capa de aire o a la superficie de la tierra.

Gradiente térmico. La relación de la disminución de la temperatura con la altura, es lo llamado gradiente térmico. El perfil de temperatura se refiere a una curva de temperatura contra altura. Cuando la temperatura promedio en la parte más baja de la atmósfera disminuye con la altura, el gradiente térmico medio es positivo. Dada la rapidez del viento, el gradiente térmico es un buen índice del grado de turbulencia o de la capacidad de la atmósfera para dispersar los contaminantes. Existen varias relaciones de intervalo estándares. El gradiente térmico adiabático para aire no saturado es de 5.5°F por 305.4 metros de altura, y está definido como la relación de disminución en la temperatura de una porción de aire seco o no saturado, que se mueve hacia arriba dentro de un ambiente a una presión más baja y se expande sin intercambio de calor con este aire ambiente, esta es también la relación de aumento en la temperatura para una porción de aire que desciende, bajo las mismas condiciones.

Si el aire ambiente muestra un gradiente térmico adiabático, entonces, tales porciones de aire a cualquier altura en dicho ambiente, están en un equilibrio neutral. La relación adiabática para aire saturada o el gradiente térmico pseudoadiabático es un poco menor que la relación adiabática seca a causa de la contribución del calor latente; esto es necesario en algunas ocasiones en un procedimiento con un efluente húmedo al considerar un aire ascendiendo lo suficiente como para producir una condensación por medio de un enfriamiento adiabático; al ascender más el aire, la temperatura del efluente podría disminuir hasta la relación pseudoadiabática. El gradiente térmico para las partes más bajas de la atmósfera se 3.566°F por 305.4 metros.

En una capa en la cual el gradiente térmico es superadiabático (la temperatura disminuye más rápido con la altura que la relación adiabática), como sucede en las partes bajas de la atmósfera en un día soleado con vientos ligeros, una porción de aire enfriado hasta la relación adiabática, llega a ser menos denso que su medio y por lo tanto la tendencia a subir la acelera hacia arriba, resultando como consecuencia un equilibrio inestable con su medio. Cuando el gradiente es menor que el adiabático, al ascender el aire llega a ser más denso que su medio, y se tiene que la tendencia de la fuerza es hacia abajo y este es un equilibrio estable. La inestabilidad y la estabilidad están definidas con referencia a una condición de equilibrio neutral con el representado por el gradiente térmico adiabático. Están reforzados los movimientos verticales en capas de aire inestables; en capas de aire estables, los movimientos verticales, encuentran resistencia.

El gradiente térmico en condiciones estables deben tener valor negativo o cero. Si una capa de aire no muestra cambio en la temperatura con la altura, éste es isotérmico. Si el gradiente térmico es negativo, por ejemplo, si la temperatura aumenta con la altura, a la condición se le llama inversión. Debido a que el término de inversión se refiere a una capa de aire, se podrá identificar una parte superior y una parte inferior a la vez.

El gradiente térmico significativamente con la altura, por ejemplo, en una capa con inversión con base en la tierra, el gradiente térmico puede ser isotérmico o adiabático.

La capacidad térmica y otras propiedades físicas de la forma superficial, tienen influencia en el cálculo o en el enfriamiento por radiación de la superficie de la tierra. El intercambio de calor es acompañado de congelamiento, fusión, condensación y evaporación en la superficie de la tierra y afectará también la temperatura del contorno de las capas inferiores. La formación de una niebla en una capa con inversión hará que la capa de niebla sea menos estable

Precipitación.-

La precipitación meteorológica no incluye solamente la lluvia y la llovizna, sino que también la nieve y un gran número de formas de vapor de agua en la fase sólida. La precipitación resulta por lo general al ascender un aire húmedo. La precipitación actúa como un recogedor de la partícula en el aire, debido a la inercia de las partículas, a las fuerzas superficiales, que incluyen la atracción electrostática, movimientos ocasionales de porciones de aire, etc. La eficiencia de la lluvia para recoger las partículas, es hasta cierto punto una función del tamaño de la gota, la cual es variable en la tormenta. La precipitación puede disminuir y también la concentración de gases contaminantes por absorción.

En el área de precipitación, especialmente cerca de la fuente contaminante, pueden experimentarse los efectos adversos antes de que se lleve a cabo la dispersión.

Son escasos los datos experimentales sobre la dispersión de los contaminantes que salen por chimeneas durante los períodos de precipitación, la ocurrencia de fumigaciones de efluentes desde fuentes elevadas se atribuyen a la presencia de una inversión en lo alto de una superficie caliente o al transporte debido a corrientes descendentes de aire.

Otros elementos del clima.-

Otros elementos de interés en los problemas de contaminación atmosférica son la temperatura, el vapor de agua y la niebla, la visibilidad, la condición del suelo, las nubes y la radiación

La temperatura de un aire continuo en un cierto punto nos indica que, esporádicamente existe un incremento en la turbulencia durante las inversiones nocturnas, porque al mezclarlo vertical puede ha-

cer descender un contaminante. Este transporte vertical del contaminante, puede deducirse en una altiplanicie temporal o en una elevación de la curva de temperatura por la noche.

El vapor de agua contenido en el aire y la niebla provoca ciertas condiciones de humedad baja que persiste.

Clima y Comportamiento de la Pluma.-

Circulaciones primarias, secundarias y otras.-

Existen cambios en el viento, en la estabilidad, en la lluvia y en otros elementos del clima, los cuales dan origen a varios movimientos de gran escala. Esos movimientos están asociados con:

- 1.— Las circulaciones primarias, que están representadas por la altura semipermanente y por áreas de baja presión;
- 2.— Las circulaciones secundarias, que están representadas por la altura migratoria y áreas de baja presión que cruzan el mapa climatológico, y ;
- 3.- Circulaciones pequeñas.

Dentro de las circulaciones de escala menor que las primarias y secundarias, se encuentran las brizas marinas y las de los valles. La briza marina se origina debido a que se calienta la tierra cerca de la costa más rápido que el agua lo cual puede apreciarse como una corriente densa. Esta, fluye desde el mar hacia la tierra por lo general empieza por la mañana persistiendo hasta el ocaso; en el aire este movimiento es de la tierra hacia el mar. Durante la noche estos movimientos ocurren en sentido contrario.

Transporte y Trayectorias.-

Transporte es el movimiento neto de una porción de aire o del centro de una masa de aire.

Para una fuente emisora de contaminantes continua el contaminante deberá estar más o menos diluído a través de la dirección de transporte, ya sea que la velocidad del viento sea alta o baja, debido al "estiramiento" (dilatación).

Se le llama trayectoria al lugar geométrico de las posiciones sucesivas de una porción de aire.

Pérfiles del viento y Temperatura.-

La velocidad del viento en regiones menores de algunos cientos de metros, alcanza un máximo; en la tarde cuando la inestabilidad y la difusión de momento también tienen un máximo; de otro modo, la velocidad del viento en la capa superior tiene un máximo en la noche cuando el “acoplamiento” con los efectos de fricción de superficie tienen un mínimo debido a la estabilidad y a una pequeña difusión de momento vertical.

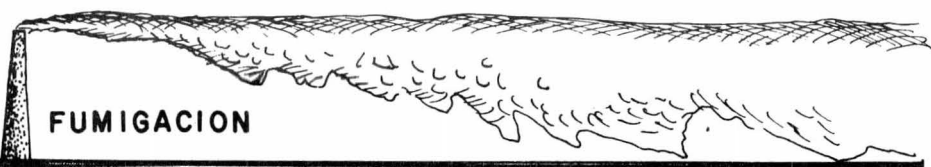
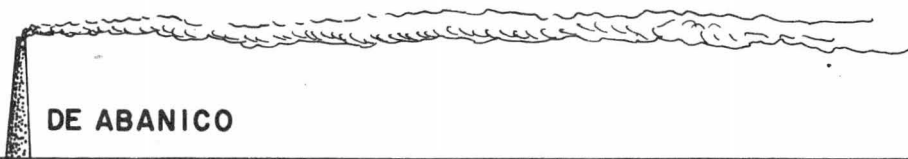
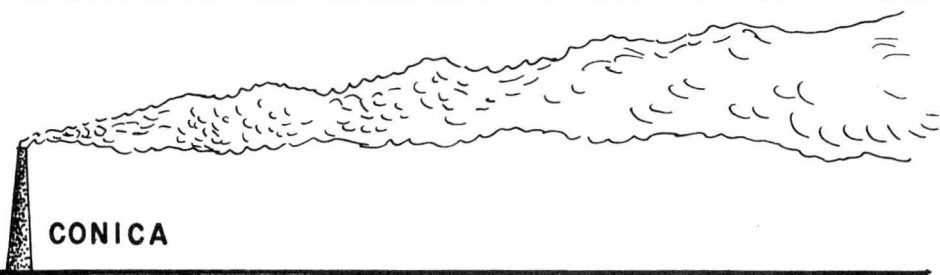
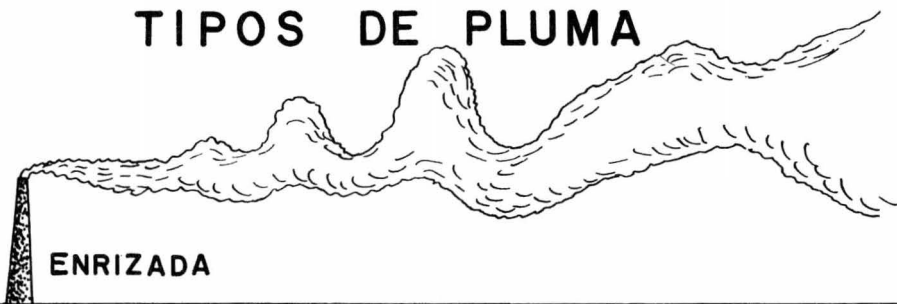
Comportamiento de la pluma y su relación con el clima.-

DESCRIPCION DE LA PLUMA VISIBLE	OCURRENCIA TIPICA	PERFIL DE TEMPERATURA Y ESTABILIDAD	VIENTO ASOCIADO Y TURBULENCIA	DISPERSION Y CONTACTO CON EL SUELO
Rizamiento y ondas irregulares Con movimientos sinuosos ocasionales; se disipa en extensiones pequeñas y relativamente rápido con la distancia.	Durante el día con cielos claros o parcialmente nublados y sol intenso; no ocurre al estar nublado, con nieve o con vientos fuertes.	1. <u>Enrizado</u> Gradiente Térmico inestable adiabático o superadiabático.	Vientos ligeros con intensa turbulencia termal.	Se dispersa rápidamente con la distancia; - grandes probabilidades de tener altas concentraciones esporádicas en el suelo que esté cerca de la chimenea.
Figura aproximada de cono con eje horizontal se disipa más allá del viento descendente que la pluma enrizada.	Durante el día o noche con vientos, los nublados la favorecen durante el día.	2. <u>Cónico</u> El Gradiente Térmico está entre adiabático seco e isotérmico -- neutral o estable.	Los vientos son desde moderados hasta fuertes, la turbulencia mecánica es la mayor -- que la termal.	Se dispersa con la distancia menos rápido que la pluma enrizada existen mayores probabilidades de que tenga contacto con el suelo, la concentración es menor pero persiste más que la enrizada.
Abanico que se estrecha horizontalmente se espase poco o no vertical; si la chimenea es alta, se ase-	En la noche y al amanecer en cualquier estación generalmente está asociado con capa o capas -- con inversión, la favore-	3. <u>De Abanico</u> Gradiente Térmico invertido o isotérmico, muy estable	Vientos ligeros, muy poca turbulencia.	Se dispersa lentamente altas concentraciones en el aire; poca probabilidad de tener contacto con el suelo

DESCRIPCION DE LA PLUMA VISIBLE	OCURRENCIA TIPICA	PERFIL DE TEMPERATURA	VIENTO ASOCIADO Y TURBULENCIA	DISPERSION Y CONTACTO CON EL SUELO.
meja a un río tortuoso, se ensancha pero no se espesa si el efluente es caliente, la pluma crece lentamente con dirección horizontal.	cen los vientos ligeros, los cielos claros y la nieve.			no obstante un aumento en la turbulencia puede hacer que toque el suelo, las grandes concentraciones a nivel de suelo, tendrán lugar si la chimenea es corta o si la pluma se mueve hacia un terreno más irregular.
Risos o conos con fondos bien definidos o pobremente definidos con cimas difusas.	Durante el cambio de gradiente a condición de inversión, por lo general cerca del ocaso o en días despejados, durando persistir por la noche.	4. <u>Enarbolado</u> Gradiente Térmico. Adiabático en la parte superior de la chimenea invertida bajo la chimenea, capa inferior estable, capa superior neutra o inestable.	Vientos moderados y turbulencia considerable en capas superiores; sin turbulencia en la capa inferior -- con vientos muy ligeros o con poco viento.	Poca probabilidad de tener contacto con el suelo, a menos que la capa de inversión esté poco profunda y que la chimenea sea corta; altas concentraciones con contacto pero generalmente el contacto se impide por la estabilidad de la capa de inversión, considerará mejor condición para dispersión por lo que los contaminantes se dispersan más arriba con poca probabilidad de tocar suelo

DESCRIPCION DE LA PLUMA VISIBLE	OCURRENCIA TIPICA	PERFIL DE TEMPERATURA	VIENTO ASOCIADO Y TURBULENCIA	DISPERSION Y CONTACTO CON EL SUELO
Abanico o cono con partes superiores -- bien definidas o fondo desigual o difuso	Durante el Cambio de-inversión a condición de gradiente, por lo general la inversión nocturna termina al calentarse el suelo y en capas superficiales por medio de mañanas soleadas;- la separación empieza cerca del suelo y en regiones superiores, menos rápido en el invierno que en el verano, - también puede ocurrir con la briza marina al finalizar la mañana o al empezar la tarde.	<u>5. De Fumigación</u> Gradiente Térmico adiabático o superadiabático en la parte superior de la chimenea y debajo; gradiente térmico isotérmico o invertido arriba. La capa inferior inestable o neutra y estable la capa superior.	Vientos ligeros a moderados en la parte superior y ligeros debajo, turbulencia térmica en la capa inferior, poca turbulencia en la capa superior.	Gran probabilidad de tener contacto con el suelo con altas concentraciones relativas en especial después de que la pluma queda estacionaria en el aire.

TIPOS DE PLUMA



Dispersión atmosférica.-

El objeto de esta sección es el presentar algunas formas usuales de la ecuación de Sutton para la difusión atmosférica junto con alguna comparación con la ecuación de Bosanquet y Pearson. El tratamiento se limita al caso de emisiones constantes y continuas de un punto en origen al aire libre en la superficie y cerca de la superficie. El contaminante se considera en cuanto a densidad en equilibrio con el aire ambiente.

Las fórmulas que se usan para la emisión de un grupo de fuentes (p. e una gran explosión) y de emisiones de material que se degrada o se descompone con el tiempo (p. e; y gases radioactivos) son las siguientes:

La concentración X (masa / metro cúbico) de un contaminante en un punto (x, y, z) , viento abajo $x > 0$ de una fuente continua de relación Q (masa/seg.) en el punto $(0,0,0)$ está dada por:

$$(1) X(x, y, z) = \frac{Q}{\pi u C_y C_z} \cdot e^{\left(-\frac{y^2}{C_y^2 x^{2-n}} - \frac{z^2}{C_z^2 x^{2-n}} \right)}$$

Origen en el punto $(0,0,0)$ en el aire libre.

Aquí el significado de la dirección del viento es a lo largo del eje x , el eje y es perpendicular a la horizontal, el eje z es la dirección del viento respectivamente (metros $^{n/2}$), y n es un parámetro adimensional con valores entre 0 y 1. La concentración sobre el eje x ($y=z=0$) está dada por el coeficiente del término exponencial.

$$Q / \pi u C_y C_z x^{2-n}$$

Para un punto en la superficie, la distribución de concentraciones por lo general esumen ser completamente reflectadas por la superficie. Entonces la ecuación (1) se aplica con el miembro del lado derecho aumentando por un factor de 2.

Con una fuente elevada de una altura h (metros) y con la misma consideración.

$$(2) \quad X(x, y, z) = \frac{Q}{\pi u C_y C_z x^{2-n}} \cdot e^{\left(-\frac{y^2}{C_y^2 x^{2-n}} \right) - \frac{(z+h)^2}{C_z^2 x^{2-n}} - \frac{(z-h)^2}{C_z^2 x^{2-n}} } + e$$

Origen sobre la superficie $z=0$ en el punto $(0,0,h)$.

El origen del sistema de coordenadas $(0,0,0)$ se encuentra debajo de la superficie.

La distribución de concentración del contaminante sobre la superficie $z=0$, llega a ser:

$$(2a) \quad X(x,y,0) = \frac{2Q}{\pi u C_y C_z x^{2-n}} \cdot e^{\left(-\frac{y^2}{C_y^2 x^{2-n}} - \frac{h^2}{C_z^2 x^{2-n}} \right)}$$

Origen sobre la superficie $z = 0$ en el punto $(0,0,h)$

La concentración $X(x,y,0)$ en la superficie tiene un máximo

$$(2b) \quad X_{\max}(x_{\max}, 0, 0) = \frac{2}{e\pi} \cdot \frac{Q}{uh^2} \cdot \frac{C_z}{C_y} \left(\frac{2}{e\pi} = 0.234 \right)$$

a una distancia (pies) de altura del origen.

$$(2c) \quad x_{\max} = \left(\frac{h}{C_z} \right)^{\frac{2}{2-n}}$$

Las ecuaciones de Bosanquet y Pearson correspondientes a (2a), (2b) y (2c) son:

$$(3a) \quad X(x,y,0) = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} p q u x^2} \cdot e^{\left(-\frac{y^2}{2q^2 x^2} - \frac{h^2}{px} \right)}$$

Origen sobre la superficie $z = 0$ en el punto $(0,0,h)$

$$(3b) \quad x_{\max} (x_{\max}, 0, 0) = \left(\frac{8}{\sqrt[4]{11} e^4} \right)^{1/2} \cdot \frac{Q}{u h^2} \cdot \frac{p}{q}$$

$$\left(\frac{8}{\sqrt[4]{11} e^4} \right)^{1/2} = 0.216$$

$$(3c) \quad x_{\max} = \frac{h}{2 p}$$

donde q y p son los coeficientes de difusión adimensionales perpendiculares vertical y lateral a la dirección del viento respectivamente; los otros símbolos significan lo mismo que en la ecuación de Sutton. Las ecuaciones de Bosanquet tienen dos parámetros q y p , mientras que en las de Sutton, con excepción de la ecuación (2 b), tienen tres, C_y , C_z , y n , consecuentemente las ecuaciones de Sutton poseen un mayor grado de flexibilidad.

Las formas adimensionales de las ecuaciones (2a) y (3a), a lo largo del eje de la pluma ($y=0$), con una concentración relativa expresada como la concentración máxima de la ecuación (2b) y (3b) y una distancia relativa a las distancias por las ecuaciones (2c) y (3c) son:

$$(2d) \quad \frac{x}{x_{\max}} = \left(\frac{x_{\max}}{x} \right)^{2-n} \cdot e^{1 - \left(\frac{x_{\max}}{x} \right)^{2-n}}$$

Los dos conjuntos de ecuaciones se usan en varios aspectos. Por ejemplo cuando se tiene una concentración máxima en base a la dirección del viento de una fuente emisora elevada, en ambos casos es proporcional a la fuerza de la fuente emisora y a la relación de los coeficientes de difusión vertical y lateral e inversamente proporcional a la velocidad del viento y al cuadrado de la altura de la fuente emisora. La distancia de la máxima concentración a la superficie de la fuente emisora elevada, se incrementa con la altura de la fuente y decrece al aumentar el valor del coeficiente de difusión vertical. Las relaciones de proporcionalidad son idénticas para $n = 0$ en la ecuación.

$$(3b) \quad X_{\max} (x_{\max}, 0, 0) = \left(\frac{8}{\sqrt[4]{e}} \right)^{1/2} \cdot \frac{Q}{u h^2} \cdot \frac{p}{q}$$

$$\left(\frac{8}{\sqrt[4]{e}} \right)^{1/2} = 0.216$$

$$(3c) \quad x_{\max} = \frac{h}{2p}$$

donde q y p son los coeficientes de difusión adimensionales perpendiculares vertical y lateral a la dirección del viento respectivamente; los otros símbolos significan lo mismo que en la ecuación de Sutton. Las ecuaciones de Bosanquet tienen dos parámetros q y p , mientras que en las de Sutton, con excepción de la ecuación (2 b), tienen tres, C_y , C_z , y n , consecuentemente las ecuaciones de Sutton poseen un mayor grado de flexibilidad.

Las formas adimensionales de las ecuaciones (2a) y (3a), a lo largo del eje de la pluma ($y=0$), con una concentración relativa expresada como la concentración máxima de la ecuación (2b) y (3b) y una distancia relativa a las distancias por las ecuaciones (2c) y (3c) son:

$$(2d) \quad \frac{X}{X_{\max}} = \left(\frac{x_{\max}}{x} \right)^{2-n} \cdot e^{1 - \left(\frac{x_{\max}}{x} \right)^{2-n}}$$

Los dos conjuntos de ecuaciones se usan en varios aspectos. Por ejemplo cuando se tiene una concentración máxima en base a la dirección del viento de una fuente emisora elevada, en ambos casos es proporcional a la fuerza de la fuente emisora y a la relación de los coeficientes de difusión vertical y lateral e inversamente proporcional a la velocidad del viento y al cuadrado de la altura de la fuente emisora. La distancia de la máxima concentración a la superficie de la fuente emisora elevada, se incrementa con la altura de la fuente y decrece al aumentar el valor del coeficiente de difusión vertical. Las relaciones de proporcionalidad son idénticas para $n = 0$ en la ecuación.

Los valores de un rango n de $1/5$ a $1/2$, Sutton los propone para un rango de estabildades de "gran intervalo" a "gran inversión". En un resumen de los resultados de un trabajo experimental reciente, se adoptó para todas las condiciones un valor n de $1/4$.

Con ayuda de gráficas se encuentra la solución conveniente a las ecuaciones de la difusión atmosférica.

Aplicación de las fórmulas de difusión a problemas de contaminación atmosférica.-

La pluma de contaminantes de una chimenea, en aire muy estable, alcanza varios kilometros en dirección del viento durante la noche, bajando hasta después de 1 a 3 horas que amanece con la inversión.

Dados la fuente emisora, la topografía y las condiciones climatológicas, la concentración del contaminante esperado en un punto de la dirección del viento, varia con el tiempo de muestreo. Los coeficientes de difusión de Sutton se aplican para tiempos de muestreo de 3 minutos aproximadamente. Para vientos estables y condiciones adiabáticas, la proporcionalidad del coeficiente de difusión $(C_y C_z)^{1/2}$ es de $1/10$ de la potencia del tiempo de muestreo que ya ha sido calculado. Con el tiempo, el coeficiente de difusión vertical aumenta menos rapido, mientras que el coeficiente de difusión lateral continua aumentando.

Valores experimentales de coeficientes de difusión a varias distancias.

C A P I T U L O V

SISTEMAS Y PROGRAMAS DE CONTROL DE LA
CONTAMINACION ATMOSFERICA

El control tecnológico de la contaminación atmosférica se puede estudiar principalmente bajo tres aspectos:

- 1.— Cambio de procesos para prevenir las emisiones de contaminantes.
- 2.— Dispersión para reducir las concentraciones de los contaminantes a niveles aceptables en el sitio receptor.
- 3.— Eliminación de contaminantes después de la emisión y antes de la dispersión.

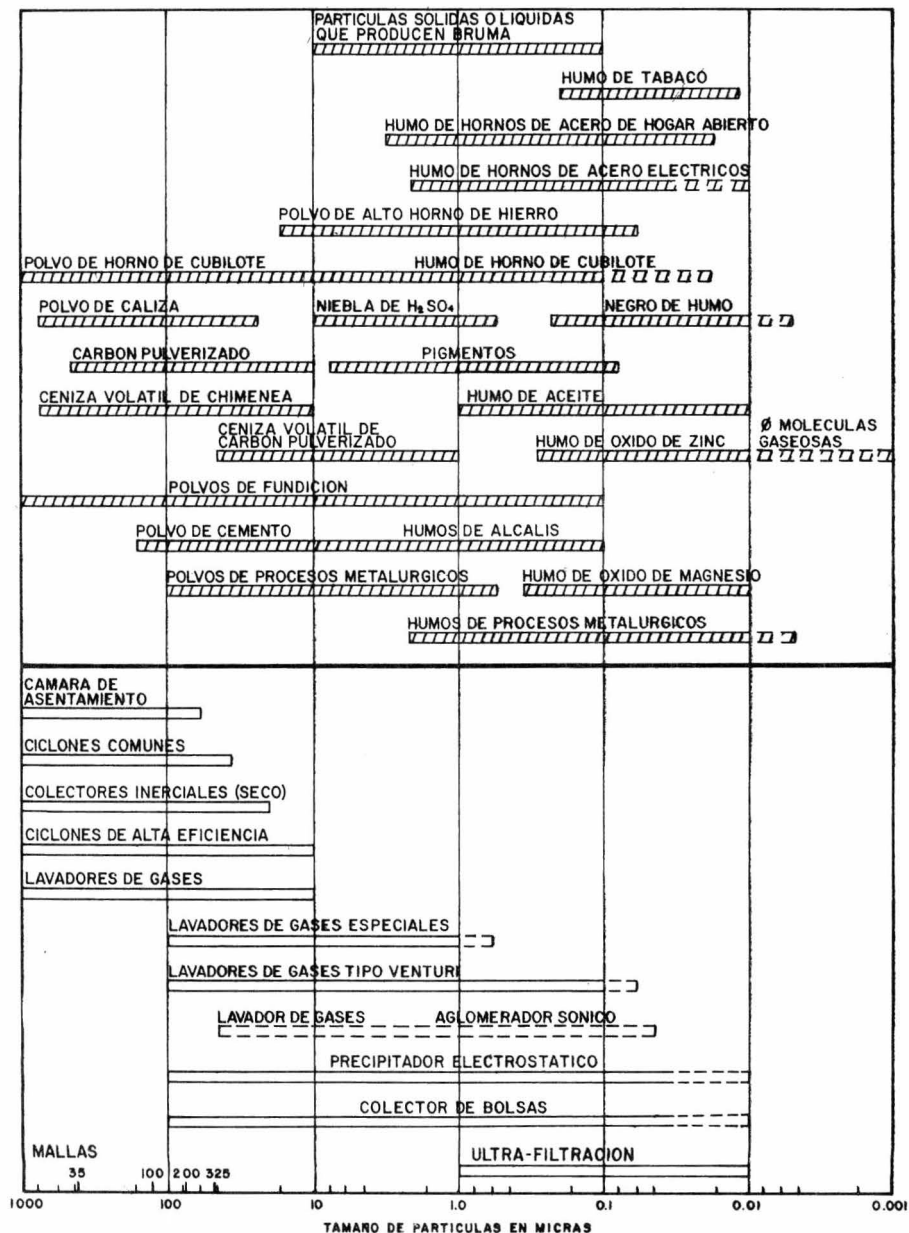
Muchas veces, los cambios en las condiciones de operación del proceso y/o en las materias pueden encontrar un solo objetivo dado o modificado de tal manera que se simplifique la solución global del problema, por medio del uso de la dispersión y/o la colección.

La dispersión es una técnica efectiva del control de la contaminación atmosférica, donde el objetivo del control es la limitación de contaminante en los lugares receptores específicos. La técnica implica el utilizar los factores meteorológicos locales— tales como la velocidad del viento y los parámetros de difusión horizontales y verticales— la topografía local y elevación, la temperatura y velocidad de los gases que transportan el contaminante. El usar chimeneas altas ha demostrado una gran efectividad para reducir las concentraciones en los sitios receptores de muchos contaminantes en varios órdenes de magnitud; una característica que es particularmente importante en muchos problemas es el olor, donde la reducción de concentraciones por debajo del valor de entrada por otras técnicas es imprácticas, tanto técnica como económicamente.

Cuando el cambio en el proceso y/o la dispersión no alcanzan el control global deseado de la contaminación atmosférica, se utiliza un tercer método general; la eliminación de los contaminantes de la corriente d gases de salida del proceso. Este método que implica muchas técnicas y tipos de dispositivos, forma el núcleo del control tecnológico de la contaminación. Para dicho efecto se han clasificado los contaminantes en tres tipos: partículas gases y olores.

Las partículas son elementos químicos o compuestos de cualquier sólido o líquido condensado en forma de pequeñas gotas. Generalmente se describen en términos de aquellas características físicas

TAMANO DE PARTICULAS DE POLVO Y HUMOS EMITIDAS EN OPERACIONES INDUSTRIALES TIPICAS Y RANGOS DE OPERACION APROXIMADOS DE EQUIPOS DE CONTROL



más importantes son el tamaño físico y la densidad con dichos parámetros se relacionan la mayoría de los mecanismos de separación. Esos parámetros también se relacionan con las propiedades más importantes de los aerosoles, de los cuales son una parte, tales como la transmisión óptica y su estabilidad. De hecho, la clasificación de varios tipos de partículas de polvos, humos, nieblas y nubes está basado en su tamaño de partícula y en su masa.

Los gases, son elementos químicos o compuestos con puntos de ebullición suficientemente bajos que existen en forma volátil a temperatura ambiente.

Se describen en términos de su composición química, su concentración y de su olor. Los parámetros críticos que se requieren, incluyen el nivel de concentración al cual debe ser reducido el gas, la solubilidad del gas en el equilibrio y los calores de solución y de reacción.

Es conveniente clasificar los gases que nos ocupan en base al elemento químico clave. Los elementos químicos claves implicados en los contaminantes gaseosos son los que se encuentran en el grupo del azufre, del nitrógeno, de los halógenos y del carbono.

Los olores son sumamente elusivos de una definición explícita. Algunas veces son identificables químicamente — como en el caso de los mercaptanos ($R-SH$), del ácido sulfhídrico (H_2S) y del sulfuro de carbono (C_2S). En estos casos, se pueden tratar en una discusión de control tecnológico junto con otros contaminantes gaseosos, químicamente identificables. La principal diferencia entre los olores químicamente identificables y los contaminantes gaseosos no olorosos, es el requisito común para la reducción de gases que producen olor a varios órdenes de magnitud de concentración por debajo de aquellas que se requieren para los contaminantes gaseosos inodoros.

TIPOS DE CONTAMINANTES GASEOSOS, PARTICULAS Y SUS FUENTES

PRINCIPALES

ELEMENTO	COMPUESTO CONTAMINANTE	PRINCIPALES FUENTES
Azufre (S)	Bióxido de Azufre (SO_2) Trióxido de azufre (SO_3) Acido Sulfhídrico (H_2S)	Procesos de Combustión Industria Química (ácido -- sulfúrico) Procesamiento gas natural, Tratamiento de aguas negras, Industria de pulpa y papel.
	Bisulfuro de Carbono -- (CS_2)	Fibras textiles (Rayón)
Nitrógeno (N)	Oxido nítrico (NO) Bióxido de Nitrógeno -- (NO_2)	Manufactura de acido nítrico (HNO_3), Procesos de nitración, Procesos de oxidación con aire a altas temperaturas, Motores de vehículos.
	Amoníaco (NH_3)	Manufactura del amoníaco
Fluor (F)	Acido fluorhídrico (HF)	Fertilizadores fosfatados
	Tetrafluorisilicato (SiF_4)	manufactura de aluminio Cerámicas y fertilizadores
Cloro (l)	Acido clorhídrico (HCl)	Manufactura de HCl, combustión de PVC, procesos de -- clorinación orgánica.
	Cloro (Cl_2)	Manufactura de cloro
Carbono (C)	Monóxido de Carbono - (CO)	Procesos de combustión incompleta, refinación del petróleo, industria metálica, - aerotransportes, motores de vehículos
	Bióxido de Carbono (CO_2)	Procesos de combustión

ELEMENTO	COMPUESTO CONTAMINANTE	PRINCIPALES FUENTES
Parafinas	Metano Butano Hexano	Procesos y transferencia de productos del petróleo: uso de solventes, motores de vehículos
Olefinas	2 - Buteno	Procesos petroquímicos, procesos y transferencia de gasolinas, motores de vehículos.
Aromáticos	Etil - Benceno	Procesos y transferencia de productos del petróleo: Uso de solventes, motores de - vehículos
Hidrocarburos Oxigenados	Formaldehído Acroleína Metilcetona 2 - Propano Fenoles Oxidos	Procesos de oxidación parcial. Operaciones de recubrimiento de superficies Manufactura de plásticos; - Procesamiento del petróleo, manufactura de óxido de etileno.
Hidrocarburos Clorinados	Tetracloruro de carbono Percloroetileno Tricloroetileno	Uso de solventes, limpiado en seco, operaciones de desgrasadoras
Hidrocarburos Nitrogenados	Aminas Piridinas	Aguas negras
Partículas Sólidas	Cenizas Polvo de carbón Carbón pulverizado Carbón	Procesos de Combustión Motores de vehículos

ELEMENTO	COMPUESTO CONTAMINANTE	PRINCIPALES FUENTES
Vapores	hollín Oxidos metálicos Polvos metalúrgicos Sales metalúrgicas Núcleos de combustión Silicatos Sílice Coloidal Polvo de cemento Piedra Caliza Arena Polvo de piedra Fertilizadores Polvos insecticidas Polvo atmosférico Polen Núcleos de sal de mar Virus y Bacterias	Polvos de catalizador de las refinерías, procesos de combustión, industria metalúrgica, motores de vehículos Industria mineral industria de la construcción Industria química; Procesos de fumigación natural
	Vapores de óxido de zinc Vapores metalúrgicos Vapores alcalinos Hornos de aceite Gotas de aceite Vapores de ácido sulfúrico Gotas de ácido Gotas de toberas hidráulicas Gotas de toberas neumáticas. Pinturas y pigmentos	Industria farmacéutica Industria metalúrgica Industria química Procesos de productos del petróleo motores de vehículos Manufactura de ácidos sulfúrico, fabricación de baterías. Recubrimiento de superficies.

Muchos olores —tales como los de la carne descompuesta y los de los procesos alimenticios— parten de sustancias complejas, las cuales no se definen químicamente con facilidad. En esos casos, es común hacer pruebas para definir los olores subjetivamente por medio de términos descriptivos, tales como los relacionados a la florería, y determinar el olor en los niveles de entrada por dilución progresiva en el aire hasta que se alcance la concentración a la cual se puede identificar el olor.

El sistema olfativo de los mamíferos, es hasta la fecha, el instrumento más satisfactorio para la medición del olor, a pesar de no estar calibrado.

Control de la contaminación por cambio en el proceso.—

El control de la contaminación por cambio en el proceso, corresponde realmente al diseñador del proceso más que a los diseñadores del sistema de control de contaminación. Un tratamiento detallado del método, es obviamente imposible de obtener por el número tan grande de procesos y de variables del proceso que se deben tener.

Suponiendo que el problema se ha definido en términos de la existencia de ciertos contaminantes y de los niveles a los cuales se deben reducir para alcanzar el objetivo del control, deberán de considerarse siempre y de inmediato los posibles cambios al proceso en la entrada o las condiciones del proceso.

El análisis se debe hacer en base de cualquier conocimiento aprovechable sobre los efectos de los cambios en ciertas variables de operación sobre el porcentaje de los contaminantes del proceso que llegan a ser contaminantes atmosféricos.

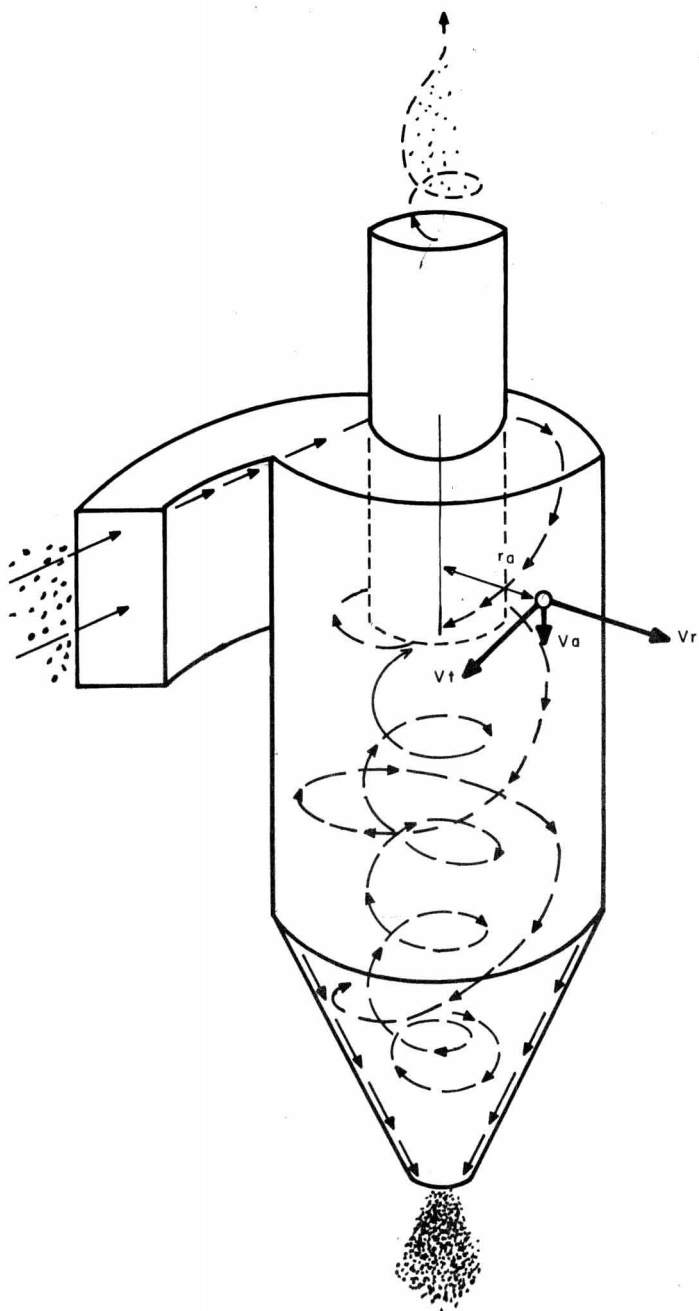
Control de la contaminación por eliminación.—

La clasificación del control tecnológico para la eliminación de contaminantes después de su formación, es más conveniente expresarla en términos de los dos tipos de contaminantes:

- a) Partículas.
- b) Gases y olores.

Partículas.—

Ciclones.— La forma más simple de un colector de partículas es el colector inercial en seco. El tipo más común que se usa actual-



PRINCIPIO DE OPERACION DE UN CICLON

mente para el control de la contaminación atmosférica, es el ciclón.

Toda la masa de la corriente gaseosa junto con las partículas se forzan dentro de un vórtice en la porción cilíndrica del ciclón. En virtud de su rotación V_t con el gas transportador alrededor del eje

del tubo y de su gran densidad con respecto al gas, las partículas son arrojadas hacia la pared a la velocidad V por la fuerza centrífuga. Aquí las partículas se transportan por gravedad y/o por remolinos secundarios hacia los polvos de salida en el fondo del tubo. El flujo en el vórtice se regresa a la parte baja del tubo, saliendo la mayoría de partículas que entraron en un principio. Los gases ya limpios pasan entonces a través del tubo central, o de salida, fuera del colector.

Existen muchas variaciones del ciclón básico en muchas, el vórtice se forma debido al movimiento de aspas, más que una entrada tangencial — generalmente se llaman de ejes aspadados o tipo multi-tubos. Muchos utilizan mecanismos para la recuperación de la energía en el tubo de salida del gas, después de la separación de las partículas. Dichas conversiones, algunas de energía cinética rotacional a presión estática, con lo cual reduce la energía total que se requiere en la entrada, para establecer las velocidades de separación deseadas.

En el ciclón, es necesario acelerar el gas hasta alcanzar una velocidad tangencial de la partícula suficientemente alta. La relación entre las variables de operación, el diseño del ciclón y la velocidad tangencial, se deriva de la ecuación de Bernoulli. La aceleración del gas y de las partículas hasta la velocidad tangencial, se lleva a cabo al expandirse el gas y al efectuarse un cambio en la presión P . El cambio de presión depende de las variables de operación, tales como la presión del gas, la temperatura, el peso molecular, y el diseño del tubo, el cual determina esencialmente, como la presión estática se convierte eficientemente en una velocidad. La rotación de las partículas alrededor del eje del tubo a la velocidad tangencial, da como resultado una fuerza centrífuga, la cual da origen a que las partículas emigren hacia afuera a una velocidad relativa al gas, es decir, a la velocidad radial de la partícula.

FORMULAS DEL COLECTOR CICLONICO

$$V_t = k_1 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_g}} \rho_g \times \frac{WP}{T}$$

$$V_R = \frac{2V_t^2}{9\eta r_a} (\rho_p - \rho_g) (a^2)$$

$$Eff = f(V_R)$$

$$Q = k_2 V_t$$

donde:

Eff = Fracción colectada, porciento en peso

V_R = Velocidad radial de la partícula

V_t = Velocidad tangencial de la partícula

η = Viscosidad del gas

r_a = Radio promedio de rotación

ρ_p = Densidad de la partícula

ρ_g = Densidad del gas

a = Radio de la partícula

Q = Capacidad volumétrica del flujo

$k_1 k_2$ = Constantes dependientes del diseño del ciclón

ΔP = Caída de presión

W = Peso molecular del gas

P = Presión del gas

T = Temperatura absoluta del gas

Las variables críticas implicadas en la velocidad radial de la partícula, la velocidad tangencial, que es una función de la potencia en la entrada A P, la viscosidad del gas y el radio del tubo. Generalmente la eficiencia es una función incrementada de la velocidad radial de la partícula. Esta relación no puede definirse explícitamente, principalmente, por los factores de reincrustamiento, de impacto y de interacciones entre las partículas. Pero con las ecuaciones descritas para el ciclón, aquellos factores que afectan la eficiencia y su dirección, se pueden identificar. Es de notar, que un incremento en el radio de la partícula, origina un aumento apreciable en la velocidad radial, resultando un incremento en la eficiencia. La característica básica de ejecución de un colector de ciclón típico es conocida como la curva de eficiencia del colector fraccional. Esta, generalmente se establece experimentalmente por el empleo de tales ciclones. Esta es la herramienta básica de ingeniería junto con la fórmula de caída de presión en el flujo, para el diseño de los ciclones. Con dichas curvas y un conocimiento de la distribución del tamaño de la partícula y la gravedad específica del material a eliminar, uno puede calcular, por simple integración numérica, la eficiencia global esperada.

Es interesante notar cómo rápidamente la eficiencia de los colectores ciclónicos decrece cuando se trata de partículas de diámetro alrededor de 10 micras. Esta es la característica sobresaliente de los colectores ciclónicos — su incapacidad para coleccionar materiales muy finos con alta eficiencia y la rápida disminución en la eficiencia para cierto tamaño crítico de la partícula, un factor que a menudo conduce a su uso como clasificador.

El intentar minimizar el radio de rotación para maximizar la velocidad radial así como la eficiencia, ha generalizado el uso extenso de ciclones con tubos de pequeño diámetro arreglados en paralelo para dar la suficiente capacidad de flujo en grandes instalaciones, sin una excesiva caída de presión.

Los colectores mecánicos se pueden usar para limpiar gases que contengan bajas cantidades de humedad, si la temperatura permanece superior al punto de rocío y si la operación no es cíclica. Cuando se tienen valores inferiores al punto de rocío, puede haber pro-

blemas de taponamientos, especialmente cuando se usan tubos de diámetro muy pequeño.

Debido a su simplicidad de construcción y a la falta de partes móviles, los ciclones se aprovechan para una gran variedad de materiales, incluyendo cerámica, y se aplican para un vasto rango de temperaturas, desde inferiores a la ambiente hasta 2000°F. Se pueden usar a elevadas presiones del gas, el único factor crítico llega a ser el requisito para proporcionar incrementos en la potencia de entrada para mantener las velocidades de separación requeridas. No son sensitivos a la concentración en la entrada — de hecho, su eficiencia aumenta con el aumento en la concentración de partículas, probablemente por las interacciones entre las partículas.

[La mayoría de los ciclones se usan solamente bajo las siguientes situaciones generales:

- 1.— Donde los polvos son gruesos
- 2.— Donde las concentraciones son más bien altas por encima de 3 granos/pie³.
- 3.— Donde se desea una clasificación del material de entrada.
- 4.— Donde una eficiencia muy alta no es un requisito crítico.
- 5.— Donde se reduce la opacidad de una pila, la cual está dependiendo en principio de un tamaño fraccional fino de la partícula (no es un criterio).
- 6.— En precolectores en conjunción con los colectores, que son más eficientes con las partículas finas.
- 7.— Como escobillones para eliminar partículas gruesas, adicionados con otros equipos, los cuales eliminan las partículas finas.

Los ciclones son los más bajos en el costo inicial, de las cuatro clases genéricas de colectores de partículas. Para colectores de multitubos por fuera de la coraza de pequeño diámetro, el costo inicial para los colectores en los 100,000 acfm (pies cúbicos reales por minuto de capacidad), los rangos son alrededor de \$0.10 a \$1.25 por acfm de gas tratado. La costumbre especial de diseño, establece que los ciclones pueden tener un costo inicial tan alto como \$3.20 por acfm. El costo de la instalación, generalmente, añade otro 25% al costo de operación para la mayoría de colectores ciclónicos, que es alrededor de \$0.65 por año por acfm en la capacidad de diseño.

El costo de mantenimiento general, está en el rango de \$0.38 a \$0.59 por año por acfm, en la capacidad de diseño.

X Lavadores.— El siguiente colector particular en términos de complejidad relativa y costo inicial, es el colector en húmedo. Como en el caso de los colectores inerciales en seco, existe una gran variedad de tipos de lavadores individuales y configuraciones. De nuevo, todos operan bajo el mismo principio básico. En un colector en húmedo, las partículas aerosoles primarias, se ponen en contacto con los llamados blancos — los cuales pueden ser superficies húmedas o pequeñas gotas individuales. En la mayoría de lavadores de gran uso esos son invariablemente los últimos con superficies sólidas o líquidas, funcionando como eliminadores de niebla. Los eliminadores de niebla desempeñan la función de separación del lavado líquido de la corriente del gas. El requisito de capacidad de ejecución es menos rigurosa en el eliminador de niebla, por lo que las pequeñas gotas del líquido con sus partículas capturadas, tienen la suficiente masa para poder llevarse a cabo la separación inercial simple. Los eliminadores de niebla, pueden desempeñar también una función de enfriamiento.]

Como las partículas primarias intentan seguir las corrientes de flujo alrededor de las pequeñas gotas que sirven de blanco, su inercia motiva a moverse relativamente a las partículas, de la corriente de flujo hacia la superficie de las gotas. Cierta porcentage en la sección transversal total, lo abarca la pequeña gota en movimiento. Este porcentaje, se conoce como la eficiencia del blanco de la gota. Las eficiencias del blanco se han correlacionado analítica y experimentalmente con parámetros adimensionales, conocidos como "parámetros de choque" o "número de separación". Este parámetro de choque está definido dentro de las fórmulas para el colector en húmedo, junto con las otras ecuaciones básicas simplificadas que gobiernan la operación del lavador. Fijándose en la ecuación del parámetro de choque se nota, que de nuevo el tamaño de partícula, la densidad de la partícula y la viscosidad del gas, son variables críticas. Se puede adicionar otros dos variables críticas: la velocidad relativa entre la partícula y el blanco y el diámetro de la pequeña gota que sirve de blanco.

FORMULAS DEL LAVADOR EN HUMEDO DE ALTA ENERGIA

$$\Psi = \frac{2}{9} (\rho_g - \rho_p) \frac{V_{Rv} a^2}{\mu_g D_b}$$

$$Eff = 1 - \exp(-kL \sqrt{\Psi})$$

$$D_b = f(\mu_L, V_N, \sigma_L, L)$$

donde Ψ = Parámetro de impacto

ρ_p = Densidad de la partícula

ρ_g = Densidad del gas

V_{Rv} = Velocidad relativa de la partícula hacia el blanco

V_N = Velocidad en el orificio de atomizado

a = Radio de la partícula

μ_g = Viscosidad del gas

μ_L = Viscosidad del líquido

D_b = Diámetro del blanco

Eff = Fracción colectada

L = Relación líquido a gas en volumen

k = Constante

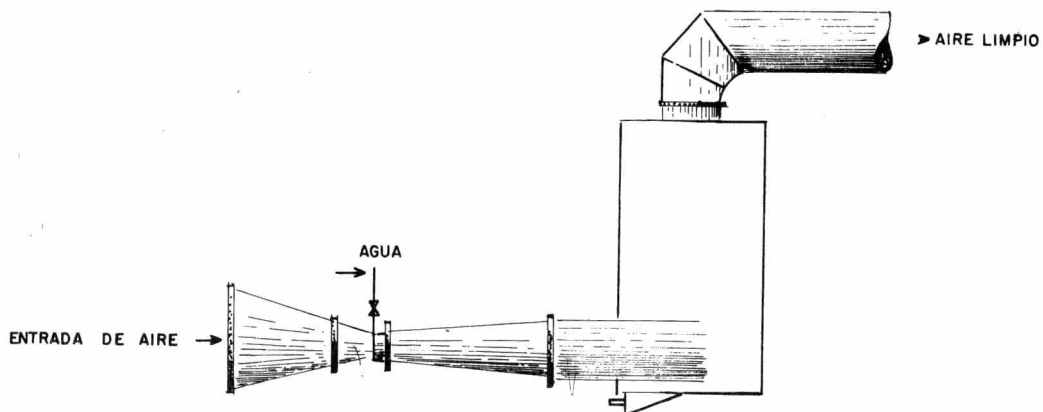
σ_L = Tensión superficial del líquido

El parámetro de choque define la eficiencia del blanco y de una pequeña gota individual. Una ecuación de eficiencia para un lavador que tenga un gran número de partículas y un gran número de blancos se ha utilizado y verificado experimentalmente bajo condiciones controladas. De las ecuaciones para el colector en húmedo, puede verse que a mayor parámetro de choque y a mayor relación líquido gas mayor eficiencia. Es evidente, que del parámetro de choque y de la ecuación de la eficiencia, que las mayores eficiencias se obtendrán cuando los radios de la partícula, la densidad de la partícula y la velocidad relativa entre la partícula y la pequeña gota que sirve de blanco sean altos y cuando la viscosidad del gas y el tamaño de la gota sean bajos.

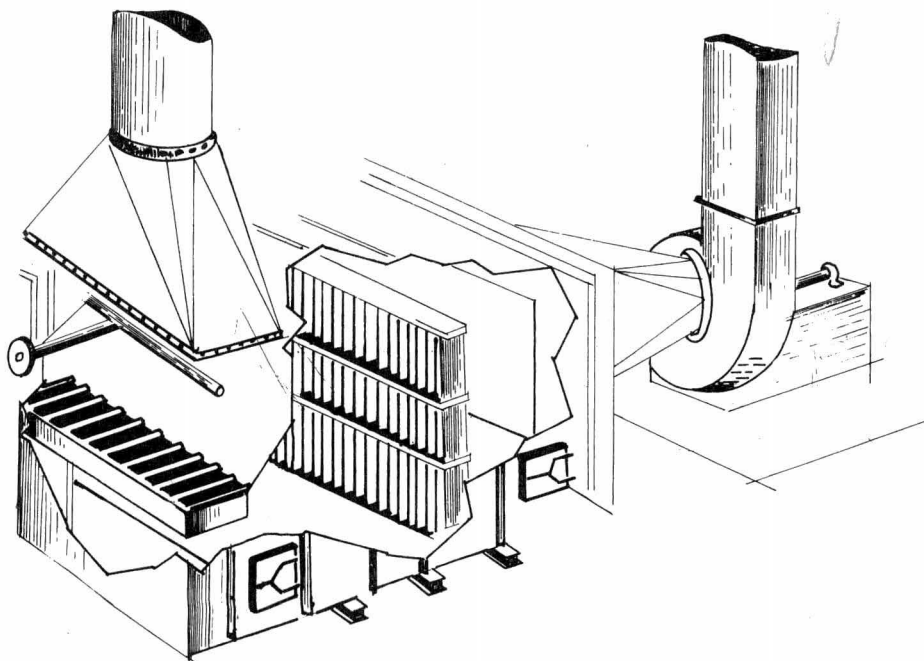
La información se puede aprovechar para orificios de atomizado, la cual demuestra que para el orificio hidráulico y para el orificio multifluido, el tamaño de la gota que sirve de blanco decrece al aumentar la velocidad en el orificio, y se aumenta al incrementar la relación líquido-gas, la viscosidad del líquido y la tensión superficial del líquido.

Desafortunadamente, una relación específica entre el sistema energético a la entrada, la geometría del lavador y la velocidad relativa no se ha establecido hasta ahora. Esto se ha demostrado sin embargo, basado en un gran número de pruebas individuales, que para los propósitos de diseño de la ingeniería práctica, la relación V_{RV}/D es una función de la potencia total disipada en turbulencia en el sistema — prescindiendo de la geometría del mecanismo. Este es un factor muy importante y esencialmente proporciona las bases de una metodología para el diseño práctico, en la ausencia de un completo entendimiento del proceso

Lo que dice esta metodología, es que, dada una pérdida de energía total en turbulencia por unidad de volumen del gas, la eficiencia del lavador depende solamente de otras variables en la ecuación de eficiencia, que son la densidad de la partícula, el tamaño de la partícula, la relación líquido a gas y las propiedades físicas del líquido. Esto es si éstas están mezcladas, entonces en teoría cualquier mecanismo de lavado — prescindiendo de su geometría, hará el mismo trabajo si se opera a la misma turbulencia total por unidad de



VENTURI CONVENCIONAL



VENTURI MULTIPLE

volumen del gas. Esta turbulencia se puede apreciar por pérdidas en la misma corriente principal del gas, por el uso de orificios atomizados, los cuales usan una fuente externa de energía, tal como una presión neumática o hidráulica, por medio del uso de agitadores mecánicos o por cualquier otra combinación entre los tres; pero al final resulta lo mismo.

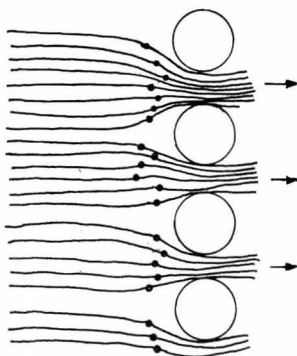
Así, las variables críticas en los colectores en húmedos, son el tamaño de partícula y la gravedad específica, la potencia total de entrada por unidad de volumen del gas, la viscosidad, las propiedades físicas del líquido tales como su viscosidad y su tensión superficial y la relación líquida a gas.

Ya que la turbulencia que se requiere para el lavador puede producir de muchas maneras, existe un número tremendo de diseños de lavador, variando desde simples cámaras de espumas hasta maquinaria mecánica muy cara y compleja. Los colectores en húmedos de alta energía en la entrada tienen capacidad para coleccionar partículas en un rango inferior a las micras. De donde, los lavadores que utilizan un medio líquido, se pueden usar simultáneamente como mecanismos químicos de transferencia de masa. Y por su amplia interfase gas líquido son mecanismos eficientes de transferencia de masa y pueden enfriar los gases a la temperatura de saturación adiabática de la corriente de gas a la entrada.

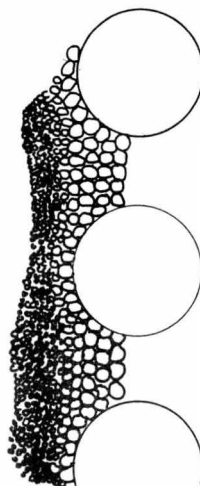
✕ Los lavadores de alta energía generalmente se usan donde:

- 1.— Las partículas deben eliminarse con gran eficiencia.
- 2.— Un enfriamiento es deseable y que la adición de la mezcla no es problema.
- 3.— Los contaminantes gaseosos, tales como partículas, están involucrados.
- 4.— Los gases son combustibles.
- 5.— Los volúmenes no son extremadamente altos (alto costo de operación por cfm).
- 6.— Las grandes variaciones en el proceso de flujo se deben ajustar (solamente el tipo de orificios).
- 7.— Las caídas de presión son altas, relativamente tolerables.
- 8.— El problema de lavado del contaminante líquido con el (los) material (es) eliminado (s) del gas, se pueden manejar.

CONDICIONES INICIALES



CONDICIONES FINALES



PRINCIPIOS DE OPERACION EN LA SUPERFICIE DE UN FILTRO DE TELA

El costo inicial para los colectores es húmedo en el rango de los 100,000 acfm de capacidades de \$3.20 a \$4.50 por acfm en acero blando y a \$8.20 en acero inoxidable. La evaluación es generalmente alrededor de más del 25%. El costo de operación es relativamente alto, por la energía de entrada que se requiere para coleccionar inercialmente partículas de pequeña masa. Los rangos del costo de operación van de \$3.20 a \$8.80 por año por acfm de capacidad, dependiendo del problema. El costo de mantenimiento es bajo, en el rango de \$0.15 a \$0.25 por año por acfm de capacidad.

⌈ Filtros.— En esencia, los filtros son limpiadores al vacío muy grandes, con filtros de varias configuraciones hechos de tejidos porosos. Las cuales pueden tener aplicaciones individuales termales, químicas y mecánicas. La forma usual de filtros comprende un número de bolsas cilíndricas infladas, generalmente por los gases que se deben limpiar al pasar a través del filtro. Las partículas suspendidas en la corriente del gas chocan y se adhieren al filtro y así se eliminan de la corriente del gas. En los llamados filtros de “superficie” el depósito de polvos coleccionados llega a ser, de hecho, el medio filtrante de las partículas. En el tipo conocido como filtros “profundos”, el medio filtrante es un tejido de fieltro en el cual las partículas pueden penetrar, pero no pasan a través de él, por el paso tortuoso que tendrían que seguir.

⌈ Este tipo de filtro, generalmente requiere, substancialmente menos área recubierta para una carga dada, que un tipo de filtro de superficie. Pero éste no se puede usar con ciertos polvos, y donde los volúmenes son grandes, la ventaja económica de su relación aire o re-vestimiento, tiende a ser balanceada por otros factores de costo. Las partículas acumuladas ayudan también a la operación de filtración en este tipo de filtro y ambos tipos pueden lograr una eficiencia muy alta en la colección de partículas de tamaño inferiores a la submicra. ⌋

Este mecanismo básico de filtración superficial se ilustra esquemáticamente. Muestra a la izquierda, el medio filtrante y las condiciones de flujo para las condiciones iniciales. El mecanismo de la colección inicial es idéntico al descrito para los colectores en húmedo, aunque en los filtros, la interceptación directa, la difusión y los efectos eléctricos pueden plantear también un papel muy importante. La torta filtrada se va formando con el tiempo como se muestra a la

derecha de la figura. La torta por sí misma, hace notar las características de los filtros más sobresalientes: su capacidad para eficiencias muy altas de partículas muy finas y uniformes.

Los filtros considerados desde el punto de vista de ingeniería, raramente preocupan la predicción de la eficiencia, para los filtros se tiene una capacidad de 99%, con tal que se estén manteniendo convenientemente las condiciones de operación. El problema de ingeniería, es la selección del tamaño, método de limpiado, ciclo y la caída de presión de operación, la cual dará el rendimiento operacional para varios periodos a costos mínimos globales. Estos factores graficados, dan las características típicas de operación para una bolsa típica o compartimiento de un filtro.

Empezando a tiempo cero con un filtro limpio, la caída de presión es baja. La caída de presión aumenta de acuerdo a la ecuación para los filtros.

Las principales variables se pueden identificar como:

- 1.— Velocidad superficial (conocida también como la relación aire a revestimiento).
- 2.— Coeficiente de resistencia del tejido (permeabilidad).
- 3.— Coeficiente de resistencia de la torta, la cual es dependiente del tamaño de la partícula, forma humedad, etc. La humedad es, particularmente, un factor importante ya que la operación debe llevarse a cabo por encima del punto de rocío en todo tiempo, para preveer los depósitos residuales en exceso, y son los llamados "tapones" de los tejidos.
- 4.— El peso de la torta por unidad de área, la cual está relacionada con la concentración de las partículas.
- 5.— La viscosidad del gas.

Con incrementos de tiempo, la caída de presión aumenta hasta el punto de donde debe reducirse, a no ser que la capacidad de flujo del sistema se reduzca o se rompa la bolsa. En este punto, el filtro se limpia por cualquiera de la gran variedad de métodos. La operación de limpiado puede llegar a destruir el tejido, particularmente con la fibra de vidrio, que es en la actualidad, el principal medio para altas temperaturas, con lo que después de un número repetido de ciclos, ocasionará una falla, y necesitará ser reemplazada. Así, una

gran cantidad de investigaciones se han dedicado a la evolución de muchos métodos de lavado para aumentar la vida de la bolsa como son la agitación mecánica, contraccionamientos, flujo reversible, sacudimiento por medio de ondas, presión de pulsación, etc. De hecho, todos los abastecedores de filtros, generalmente, utilizan el mismo medio en estos, la principal distinción entre los filtros de diferentes manufacturas es el método de suspensión y lavados de la bolsa.

La relación entre la velocidad superficial, la potencia de operación en la entrada y la vida de la bolsa para un problema dado, se pueden ver en las fórmulas para el filtro. Al aumentar la velocidad superficial del filtro, aumentará el valor de la caída de presión en la ecuación y por lo tanto la frecuencia de lavado que se requiere para tener una caída de presión dada será mayor. Pero incrementando la frecuencia de lavado, podemos reducir la vida de el tejido y aumentará los costos de mantenimiento. La destreza en el diseño de ingeniería de los filtros, es la selección del medio filtrante, la velocidad superficial y el método de lavado.

Un filtro de multicompartimentos, utiliza aire con el objeto de realizar una agitación suave de la bolsa. En ellos se puede notar que los filtros son arreglos de multicompartimentos donde el compartimento a limpiarse se saca de la corriente principal del gas durante el ciclo de limpieza. El gas sucio que entra al filtro en el punto 1, pasa a través del medio filtrante de las bolsas de la derecha, saliendo gas limpio por la parte superior del compartimento. Después de cierto período de tiempo, el compartimento de la izquierda asume la manera de operación del compartimento de la izquierda asume la manera de operación del compartimento de la derecha por medio de la operación automática de las válvulas de entrada. En ese tiempo, el ventilador se opera, el aire se hace pasar a presión entre las hileras de compartimentos del lado derecho. Debido a las agitaciones de las bolsas, el material colectado, cae en el fondo del compartimento. Al final de esta operación, el compartimento se aparta de la corriente. Existen filtros de agitación mecánica, diseñados para operaciones intermitentes, estos no tienen compartimentos; típicamente, la unidad entera debe parar el trabajo en determinado momento para la limpieza.

Naturalmente, la selección de el tejido para establecer las condiciones térmicas y químicas, es crítica. Hay que notar, que en el pre-

sente, las mayores temperaturas de operaciones se obtienen con tejidos de fibra de vidrio y son de 550 a 660°F. Las fibras de cerámica parecen prometedoras para tejidos de alta temperatura, pero es necesario que exista una mayor investigación en este campo.

En vista de las características anteriores, los filtros se utilizan generalmente:

- 1.—Donde se desean grandes eficiencias (99%).
- 2.—Donde generalmente se opera en el punto de rocío, por ejemplo donde existe baja humedad en los gases.
- 3.—Donde las temperaturas no son excesivas.
- 4.—Para volúmenes relativamente bajos y por lo tanto los lavadores o precipitadores no se utilizan normalmente; los filtros pueden ser y han sido construídos para volúmenes muy grandes.
- 5.—Cuando se va a coleccionar algún material costoso.
- 6.—Cuando suministro y el efluente de agua son un problema.

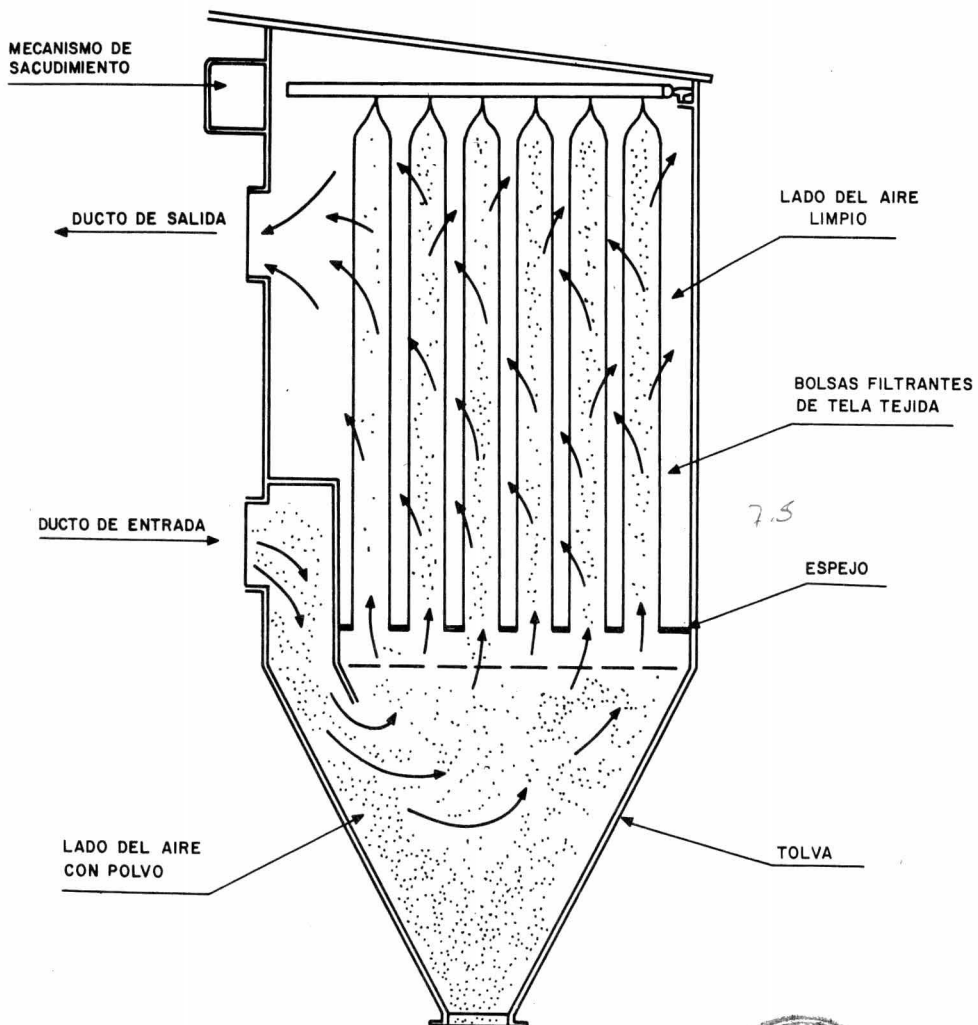
Los rangos del costo inicial para filtros son de \$6.50 a \$15.00 por capacidad acfm, dependiendo principalmente del medio filtrante. El costo máximo es aproximadamente 1.30 x costo f. o. b., El costo de mantenimiento, principalmente el reemplazamiento de bolsa varía del 10 al 25% del costo de la instalación original por año, o alrededor de \$0.65 a \$3.20 por año por acfm, dependiendo del medio filtrante.

Precipitadores electrostáticos.— Los elementos básicos de un precipitador electrostático son, una fuente de voltaje unidireccional, de preferencia con alguna variación en ésta; una corona o electrodo de descarga; un pasivo o electrodo de colección; un depósito para recibir el material coleccionado. Son tres las operaciones unitarias que ocurren en la precipitación electrostática:

- 1.—Cargado de la partícula.
- 2.—Colección de la partícula.
- 3.—Transporte del material coleccionado.

Estas tres operaciones unitarias pueden manejarse separadas o simultáneamente. En la mayoría de los principales precipitadores electrostáticos industriales ocurren simultáneamente. Tales precipitadores, son llamados a menudo de etapa sencilla o tipo Cottrell. En algunas

COLECTOR TIPO SACUDIMIENTO MECANICO

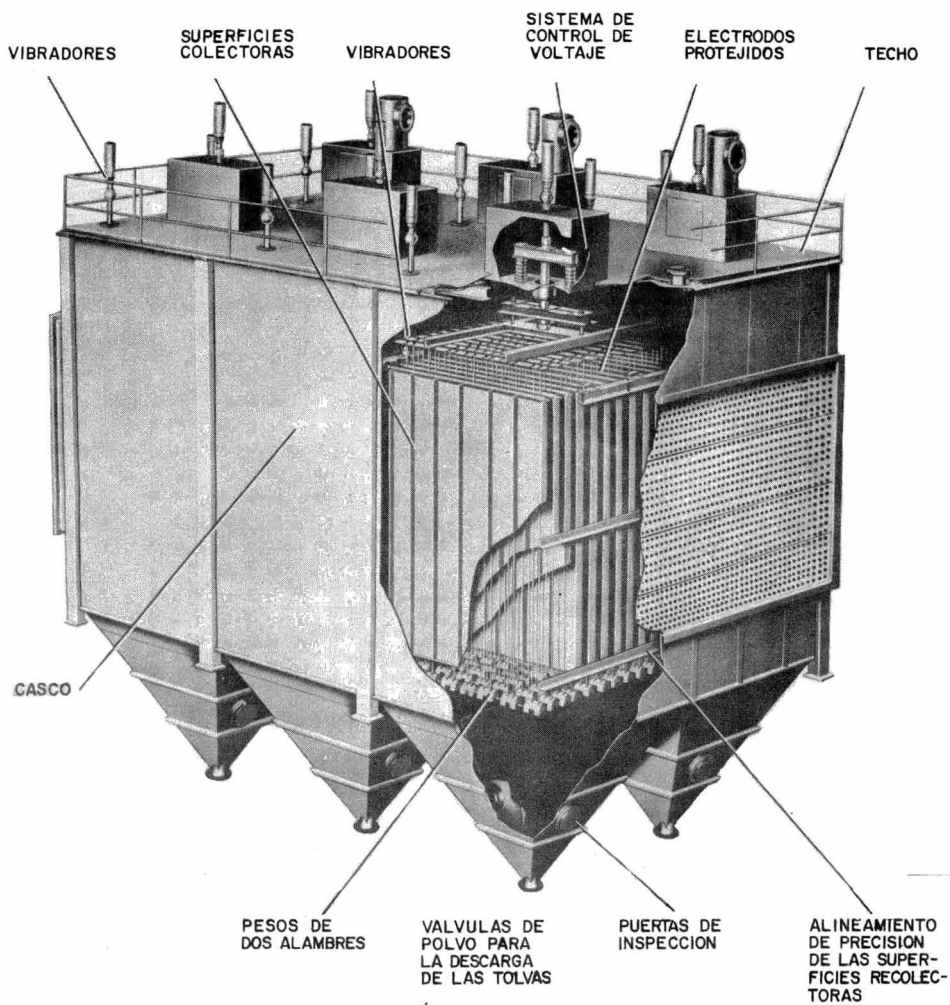


aplicaciones especiales, principalmente en la purificación del aire para una recirculación en espacios ocupados, el cargado de partícula y el material a eliminar, se manejan en distintos pasos, en secciones separadas. En cada caso, los principios de operación fundamentales son los mismos.

El cargado de partícula, se lleva a cabo por la formación de un plasma eléctrico de pares de iones electrónicos positivos, en una región muy cerca a la del electrodo de descarga. A esta descarga comúnmente se llama corona de descarga.

Esta corona de descarga abastece una fuente de iones gaseosos unipolares, los cuales emigran hacia afuera del electrodo pasivo, llenando el espacio entre el electrodo, con un espacio con carga unipolar. Las partículas que se encuentran en los gases, pasan a través de este espacio con carga, colectan esos iones del gas y ellos mismos se cargan considerablemente. El mismo campo eléctrico que ha producido el espacio con carga, llega a ser el campo colector, en el cual la partícula cargada se induce a emigrar hacia el pasivo o electrodo colector. Una vez que la partícula llega al electrodo colector, se adhiere a éste hasta eliminarse por medios mecánicos en el depósito para el almacenaje y disposiciones finales.

En la siguiente tabla, se dan las ecuaciones básicas simplificadas que gobiernan el proceso de precipitación electrostática. La eficiencia en principio se trata en base al área de superficie total del electrodo colector por unidad de volumen del gas tratado, y a la llamada "velocidad de aglutinamiento de la partícula" o parámetro de la relación de precipitación. Es importante notar que la colección en el precipitador electrostático, es fundamentalmente independiente de la velocidad de la corriente principal del flujo (sin embargo, las bajas o altas velocidades en exceso, pueden causar problemas, a parte del problema básico de colección). En los otros mecanismos de colección de partícula, es necesario acelerar la masa del gas de entrada para ser limpiado antes de que se puedan obtener las fuerzas de separación. El precipitador electrostático, de otra manera, aplica las fuerzas de separación directamente a las partículas, sin necesidad de acelerar el gas. El único problema es que se requiere en extremo de baja potencia a la entrada para la colección de partículas finas, comparado con cualquier otra forma de colector.



PRECIPITADOR ELECTROSTATICO

FORMULAS DEL PRECIPITADOR ELECTROSTATICO

$$Eff = 1 - \exp\left(\frac{-Aw}{V}\right)$$

$$w = \frac{E_o E_p a}{2\pi\eta}$$

$$E_o, E_p = f(\rho_g, R)$$

donde	Eff	=	Fracción colectada
	A	=	Area superficial de los electrodos colectores.
	V	=	Relación volumétrica del flujo
	w	=	Velocidad de la partícula seca
	E _o	=	Campo de carga, volts / distancia
	E _p	=	Campo de colección, volts / distancia
	a	=	Radio de la partícula
	η	=	Viscosidad del gas
	ρ _g	=	Densidad del gas
	R	=	Resistividad de la partícula.

Esto se nota en que el parámetro de la relación de precipitación es crítico, dependiente de la fuerza del campo, esto aparece al cuadrado. Hay que notar también, que el parámetro de relación, depende solamente de la primera potencia de el radio de partícula; en contraste, los mecanismos iniciales se afectan con más fuerza por el tamaño de partícula. A su vez, un precipitador es en extremo sensitivo a esos factores, los cuales afectan el voltaje máximo al cual puede operar. Estos son, principalmente, la densidad del gas y la conductividad eléctrica del material que llega a ser colectado.

Las fuerzas del campo, cuando los precipitadores electrostáticos operan a grandes capacidades el rango de 15,000 volts/pulg., o bien alrededor de 60,000 a 100,000 volts en los electrodos geométricos industriales.

El diseño y operación más económicos de precipitadores electrostáticos secos, se obtienen cuando, la conductividad eléctrica (o su recíproco, la resistividad, la cual es el término más común) está dentro de ciertos límites deseados. Si la resistividad es demasiado alta, las partículas cargadas llegan al electrodo colector y no pueden preder su cargo debido a la conductividad baja del material ya depositado.

Como resultado se tiene un alto gradiente de voltaje que aumenta a través de la capa acumulada substrayendo de ambos, el cargado y los campos colectores, ocasionando a su vez que los valores de w bajen.

Como este proceso es más largo o con muy altas resistencias de materiales, es frecuente que el grandiente de voltaje que cruza la capa de polvo sea suficiente para ocasionar una baja dieléctrica y un fenómeno llamado "ionización de retroceso" o "corona de retroceso", la cual provoca una fuente de iones de carga opuesta a las que se han generado en el electrodo de descarga. Estos neutralizan efectivamente el espacio de carga unipolar y tienen un efecto desastroso en el proceso total. La resistividad eléctrica es un factor crítico de operación en la aplicación de precipitadores electrostáticos. Afortunadamente, la resistividad puede controlarse en muchos casos, por la selección de la temperatura propia de operación del precipitador o por el uso de agentes simples condicionados, como el vapor de agua. Pero existen situaciones, en las cuales, los factores de resistencia hacen suponer que los equipos de soluciones alternativas puedan ser más económicos,

al menos en el primer costo básico, que los precipitadores electrostáticos.

Hay muchos otros factores, tales como, un flujo uniforme de gas adecuado y las velocidades máximas del tratamiento, las cuales son importantes en el diseño de los precipitadores electrostáticos, pero lo más importantes para el propósito de esta discusión, es el recordar que, un precipitador es básicamente un aparato volumétrico, como lo son todos los colectores, y que esto es particularmente sensitivo a la densidad del gas y a la conductividad del material a ser colectado.

El término "sensitivo" se ha usado varias veces al describir el precipitador, el cual se entiende, en vista de las muchas diferencias diminutas en el material a eliminar por pie cúbico de gas representado por 99% en lugar de el 95% de la eficiencia de colección. Con una carga a la entrada de 7 granos/pie cúbico de gas, la diferencia se elimina de un extra de 0.00004 libras de material por pie cúbico del gas. Para llevar a cabo dicha ejecución, deberá armonizarse finamente un precipitador; sin embargo, con los controles modernos de la actualidad, esto es en esencia, más bien un diseño del futuro, que un problema de operación.

La densidad del gas y la relación de flujo están limitados a cambiar y no son uniformes a través del precipitador. El control automático está, por lo tanto, dotado para conservar un voltaje continuo hasta un nivel más alto del permitido por medio del cambio de condiciones sin el precipitador y sin los rangos de corriente y de voltaje de la potencia abastecida. Es más, para una mayor eficiencia, el sistema eléctrico está dividido en dos o más secciones respondiendo cada una, solamente a las condiciones sin su área del precipitador y sin estar limitada por condiciones existentes en alguna otra parte de la unidad.

En algunas aplicaciones de un precipitador típico del tipo de plato seco, los electrodos de colección son tubos verticales con un electrodo de descarga que cuelga en cada tubo.

→ (El porqué de su potencia relativamente baja a la entrada, es porque ellos no intervienen sobre las fuerzas de separación, y porque pueden operar completamente secos, los precipitadores electrostáticos se usan donde:

- 1.— Se requieren grandes eficiencias para materiales finos.
- 2.— Los volúmenes de gas son muy elevados.
- 3.— Donde la disposición y aprovechamiento del agua son problemas.
- 4.— Debe ser recuperado un material seco costoso. }

El costo inicial para los precipitadores electrostáticos en el rango de los 100,000 acfm es alrededor de \$10.00 por acfm. Actualmente, 100,000 acfm es un volumen relativamente bajo para un precipitador electrostático. En el rango más usual es del orden de 1,000,000 acfm, el costo inicial es alrededor de \$5.00 por acfm. El costo exagerado es altamente variable, pero para ciertas plantas generalmente es de 1.70 x costo f.o.b. El costo de operación es muy bajo, cantidades de alrededor de \$0.38 por año por acfm de capacidad, el costo de mantenimiento está en el rango de \$0.25 a \$0.38 por año por acfm de capacidad.

[Los precipitadores electrostáticos, también se utilizan, siempre y cuando no resulte costoso, para la colección de nieblas y humos en atmósferas saturadas.] Aquí el principal requisito, es que el material colectado fluya libremente, o pueda arrastrarse fácilmente con espresados intermitentes de los electrodos de colección. En este tipo de aplicación se usan los precipitadores del tipo de tubos con alguna que otra diferencia debido a la economía y la necesidad para resistir a la corrosión de los materiales de construcción.

Los precipitadores llegan también a considerarse con frecuencia para la eliminación de partículas finas de corrientes de gas a temperaturas substancialmente elevadas y con presiones también elevadas. Esta posibilidad se ha demostrado con presiones cercanas a 1,000 psig y temperaturas de 1500 °F..

[Eliminación de contaminantes gaseosos y de olores.—
Adsorción.

La adsorción es un proceso por el cual las moléculas de una corriente gaseosa o líquida se unen por si mismas sobre la superficie de un sólido. El proceso se basa en la fuerza de atracción entre la superficie del sólido y las moléculas adsorbidas. Esas fuerzas varían considerablemente con la naturaleza de la superficie y de la molécula; y la intensidad de la fuerza es la base de la subdivisión entre la adsor-

ción física y química (quemisorción). En la última existe una reacción química distinta entre las moléculas de la superficie y la moléculas adsorbidas, generalmente conducen a una condición de irreversibilidad. Para la mayoría de las aplicaciones industriales, esta condición de irreversibilidad no es factible económicamente, donde el adsorbente debe ser usado solamente una vez, o los requisitos de energía para la regeneración son excesivos. Consecuentemente, la adsorción física es mucho más importante para controlar la contaminación atmosférica.

Para obtener las relaciones económicas de eliminación, se necesita exponer grandes superficies de adsorbente en la corriente que será procesada. Generalmente, se usan en esos procesos, sólidos altamente porosos con grandes áreas internas debidas a capilares muy finos. También encuentran alguna aplicación los materiales finamente divididos de un área superficial de niveles intermedios.

El carbón activado es el adsorbente más importante. Se obtienen buenos resultados con solventes y moléculas olorosas. Es relativamente no polar, tanto que la acción adsorsiva para moléculas orgánicas en presencia de agua, se desprecia ligeramente.

Los adsorbentes más polares son la alúmina, la bauxita, los cedazos moleculares y la gel de sílice. Estos, se utilizan en operaciones de secado y en procesos de adsorción en fase líquida. El intercambio de iones en arcillas y resinas encuentran alguna utilidad en operaciones de decoloración. Especialmente los carbones, como aquellos que contienen aditivos inorgánicos (Ag, Cu, Zn, etc.) y se usen para gases enmascarados y en aplicaciones relacionadas. Otros adsorbentes especiales, pueden combinar un agente oxidante sobre una gran área superficial soportada para un tratamiento a niveles bajos de contaminantes atmosféricos oxidables (KMnO_4 sobre alúmina, etc.).]

Muchos adsorbentes también se usan en procesos catalíticos.

Los adsorbentes están hechos en diferentes grados de área superficial, porosidad y tamaño de partícula. Adicionalmente, la superficie del material (vegetal, petróleo, etc., en el caso de carbón activado), la composición química ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ en el caso de

moléculas blandas), el tipo de impureza y especialmente el método de activación, son los factores más importantes que influyen en el desarrollo de la adsorción. 7

Capacidad.— Las isotermas de equilibrio definen el grado de adsorción en el equilibrio como una función de la concentración del soluto. Con un soluto dado, el grado de adsorción aumenta con la concentración del soluto, la presión del sistema y el nivel de temperatura reducida. Las moléculas grandes de altos puntos de ebullición son adsorbidas en un grado mayor y limitadas para aquellas de diámetros de poros más pequeños que el de la molécula.

En adición a esos conceptos de equilibrio, los conceptos cinéticos pueden ser importantes en la práctica. A grandes relaciones de flujo de gas, solo una pequeña fracción de la capacidad de equilibrio puede aprovecharse antes de que el soluto desaparezca y de que se lleve a cabo una eliminación insuficiente del soluto de la corriente del gas.

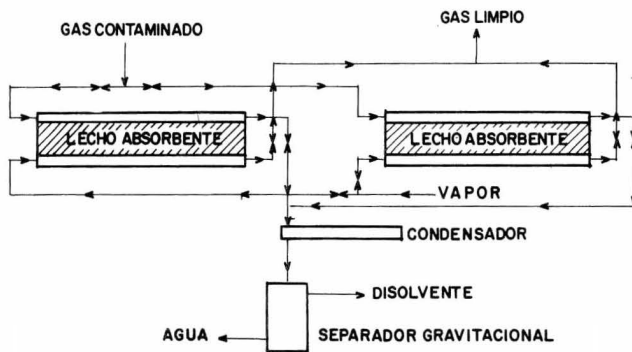
En mezclas de dos o más solutos pueden ocurrir efectos complejos. Mientras la adsorción de ambos solutos ocurre simultáneamente, como procedimiento de la adsorción, los componentes de mayor punto de ebullición pueden desplazar al más volátil.

Regeneración.— En la mayoría de las aplicaciones, se requiere una regeneración eficiente para que se lleve a cabo una economía aprovechable del adsorbente. La regeneración termal, usando vapor típicamente para elevar la temperatura del lecho hasta alrededor de 650°F, es la que generalmente se usa. El vapor se hace pasar dentro del lecho a baja velocidad, generalmente, en una dirección opuesta al flujo durante la eliminación del soluto. Las moléculas adsorbidas se mantienen sueltas a las temperaturas elevadas y se dividen entre el adsorbente y el vapor. Entonces se lleva a cabo, por lo general, el enfriamiento y secado del lecho de carbón.

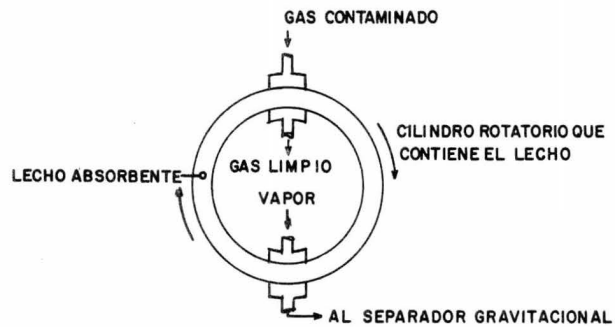
En algunos casos, cuando se eliminan de un gas concentraciones muy bajas de componentes fuertemente unidos, es económicamente razonable el deshacerse del material adsorbente cargado.

Equipo de Adsorción.—

Adsorción en lecho fijo.— Por lo general, el proceso de lecho fijo se ha usado en grandes instalaciones, utilizando lechos orienta-



PROCESO DE ADSORCION EN LECHOS SEPARADOS



PRINCIPIO DE OPERACION DE UN PROCESO DE ABSORCION CONTINUO

dos horizontalmente de 3 a 25 pies de fondo. Las clasificaciones de unidades estandares son aproximadamente de 2,000 a 40,000 cfm. Las capacidades de esas unidades para solventes comunes son del orden de 200 a 3,000 lb/hr. Las unidades completas, con ventiladores, condensador de vapor, separador y control, son flexibles. El control inicial de varias fases del proceso puede hacerse ya sea en base al tiempo o en una base analítica.

La técnica básica de la unidad del lecho catalítico involucra la carga y, alternativamente, la regeneración de dos o más unidades, con una en el vapor, la segunda llega a regenerarse por vaporización y la tercera por enfriamiento. El enfriamiento se lleva a cabo frecuentemente por el paso de aire libre de soluto a través del lecho previamente vaporizado. La carga generalmente está limitada a una temperatura máxima de 100 °F.

Las relaciones del flujo de gas típico son del orden de 60 a 100 fpm (basadas en un área seccional transversal).

Mientras que la economía favorece la recuperación de solventes de corrientes concentradas de aire, es necesario evitar los peligros que acompañan a la operación en los rangos de explosividad. Por lo general, se debe proveer del suficiente aire para evitar el exceder 25 a 50 % del límite inferior de explosividad (LEL).

El solvente recuperado se somete a una operación de destilación, especialmente, si éste está parcialmente contaminado con agua. Frecuentemente, el solvente recuperado puede recircularse al proceso sin dificultad, pero es prudente en la actualidad el probar el desarrollo del solvente recuperado que se obtiene en una instalación piloto.

Generalmente, en concentraciones alimentadas mayores de 1,000 ppm, la recuperación del solvente es provechosa. A niveles de trazas, 1 ppm, es práctico por lo general, el disponer del carbón cargado. En el rango intermedio de 1 a 1,000 ppm se ha usado regeneración oxidativa. El aire se pasa dentro del carbón usado y en conjunción con las trazas de los metales catalíticos sobre el carbón, efectuándose la oxidación del contaminante.

La adsorción continua permite el uso de cargas más pequeñas de adsorbente para una tarea dada. Mientras grandes lechos fluidi-

zados son útiles como adsorbedores continuos para aplicaciones del proceso, para la contaminación atmosférica el uso de un lecho fijo rotatorio conteniendo el carbón en un anillo rotatorio, aumenta la eficiencia del uso del carbón. El aire de alimentación entra a la coraza por las puertas, pasando a través del lecho del carbón, y salen por las compuertas que se localizan en el lado interno del lecho cilíndrico. El gas libre de solvente, viaja a lo largo del eje del cilindro y se envía a la atmósfera. Un arreglo similar permite alimentar el vapor, por el uso de válvulas, al carbón hasta alcanzar éste el punto más bajo del cilindro.

[La adsorción es un proceso de un alto costo inicial, garantizado, frecuentemente, cuando el producto se recupera para volverlo a usar.] El costo para las unidades de empaque son de \$50.00 a \$130.00 por cfm para acero al carbón y de \$63.00 a \$163.00 por cfm para construcciones de aleaciones. La instalación varía considerablemente por la naturaleza de la corriente del gas y de los contaminantes; este puede ser del rango del 20 al 50% del costo del equipo. En general, es práctico el recuperar una gran fracción de solventes descargados en operaciones de impresión, plásticas y de extracción. En otras plantas, los bajos niveles de materiales olorosos pueden eliminarse pero no recuperados pueden recuperarse de las corrientes de aire. Las instalaciones en esta categoría incluyen operaciones de efermentación, pegamento, procesamiento de productos naturales y de curtición.]

[Absorción.—

La absorción es un proceso, en el cual, un gas soluble, se transfiere de la corriente gaseosa al seno de un líquido.

El gas puede disolverse físicamente en el líquido o bien, puede reaccionar con un constituyente disuelto en el líquido.

La absorción sirve como método para la recuperación de componentes gaseosos y para purificar corrientes gaseosas. La última operación es la que más interesa. En muchas operaciones de control de la contaminación atmosférica, los componentes gaseosos solubles que se van a eliminar, constituyen niveles del 1% o menos del gas principal.

La absorción del gas es una operación difusional, que depende sobre todo de la relación de las moléculas y de la difusión de remolino. Ultimamente, la transferencia debe llevarse a cabo a través de una interfase líquido—gas. La interfase puede formarse por el uso de películas del líquido, burbujas del gas y por gotas del líquido. Se han desarrollado una gran variedad de mecanismos para efectuar la absorción del gas, basada en una dispersión en fase líquida o en una dispersión en fase gaseosa.

Una breve clasificación de esos tipos de equipos son los siguientes:

Líquido dispersado

 Película líquida

 Torre empacada

 Torre de pared húmeda

 Gotas líquidas

 Torres de espray

 Ciclón con cámara de espray

 Lavador venturi

 Lavador de platos inundado.

 Absorbedor de gas centrífugo

Gas dispersado

 Burbujas de gas

 Torre de platos

 Tanque (sparging)

 Recipiente agitado.

Los solutos gaseosos, que van a eliminarse por absorción deberán ser solubles en el medio líquido de lavado. Para la mayoría de aplicaciones de control de la contaminación atmosférica, el agua es el medio de lavado más conveniente, basado en su aprovechamiento, costo, nivel de corrosividad, volatilidad, viscosidad y la facilidad de disposición. Frecuentemente, el nivel de eliminación que se desea decrece con el gasto del líquido de lavado por lo que éste deberá mantenerse en exceso y constante, debido a la solubilidad limitada del soluto en el agua. Debido al elevado gasto del líquido, la caída de presión se incrementa al igual que los costos. En con-

secuencia, los mejores sistemas de absorción de gas son aquellos en los cuales, el soluto disuelto ejerce una presión parcial negligible sobre la solución; esto se realiza mediante una reacción química. Así, los ácidos se absorben en soluciones alcalinas para formar sales no volátiles como por ejemplo: ácido clorhídrico en soluciones cáusticas ácido sulfhídrico en etanolamina, etc.

En algunos casos, cuando el nivel de concentración de soluto es suficientemente alto y posee a su vez cierto valor económico, se procura recuperar el soluto en forma concentrada. En dichos casos, se utiliza un proceso regenerativo. Por lo común se forman compuestos inestables al calor (bicarbonatos, sales amoniacales), quedando entonces sujeta la solución a una regeneración térmica, una recuperación del soluto, un enfriamiento y un reuso. Esto no se ha adoptado en el control de la contaminación atmosférica debido a los bajos niveles de contaminantes y a la complejidad de algunas corrientes contaminadas. Sin embargo, el proceso de absorción regenerativo se sigue estudiando para la eliminación del dióxido de azufre en la chimenea.]

Otros mecanismos comunes para reducir la presión parcial del contaminante, es por medio de una oxidación dentro de la solución. Los oxidantes pueden ser el cloro, el permanganato y el oxígeno (con un catalizador disuelto), al igual que los oxidantes reversibles como lo son las quinonas, quelatos de fierro, cobalto, níquel y similares. Así, el ácido sulfhídrico que tiene una solubilidad limitada en agua, se oxida en sulfato (no volátil) o en azufre elemental. Los compuestos volátiles olorosos, se convierten en ácidos menos volátiles y a dióxido de carbono.

Cinética de la absorción. La expresión para la transferencia del soluto de la fase gaseosa a la fase líquida es:

$$N_A = K_G AP \Delta Y$$

donde N_A = moles transferidas por hora

K_G = coeficiente de transferencia de masa, moles/hr/pie²/atm.

P = presión total

Y = fuerza directriz diferencial, expresada en unidades de concentración de la fase gaseosa.

A = área interfacial

La expresión en esta forma, se basa en las unidades de la concentración de la fase gaseosa, que es lo más útil, en el campo de la contaminación atmosférica, donde, en la mayoría de casos de absorción gaseosa, ésta implica la eliminación de solutos moderadamente solubles que se encuentran presentes en bajas concentraciones dentro del aire. Para esos casos, la resistencia a la transferencia de masa se controla por medio de una difusión de la fase gaseosa, con lo cual es más confiable el uso de la presión parcial en unidades de concentración.

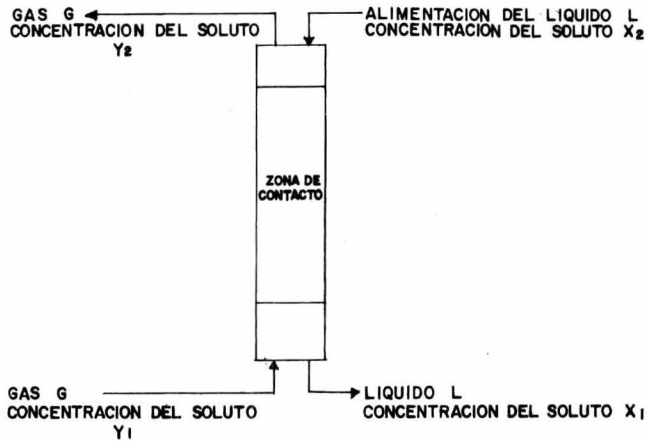
El coeficiente de transferencia de masa basado en las concentraciones de la fase gaseosa, es una función de las propiedades físicas del soluto del nivel de turbulencia, de la temperatura y de las dimensiones características del sistema.

El término de área A , se refiere a el área interfacial del sistema. En el caso que se trate de gotas de líquido, éste término define a el área total de superficie de las gotas. En las torres empacadas, el término se refiere a la totalidad del área interfacial de superficie y se expresa con más frecuencia sobre una base volumétrica (como un término combinado $K_G A$), sin embargo se utiliza poco el definir por separado el efecto del líquido sobre una superficie mojada dentro de la pieza del equipo.

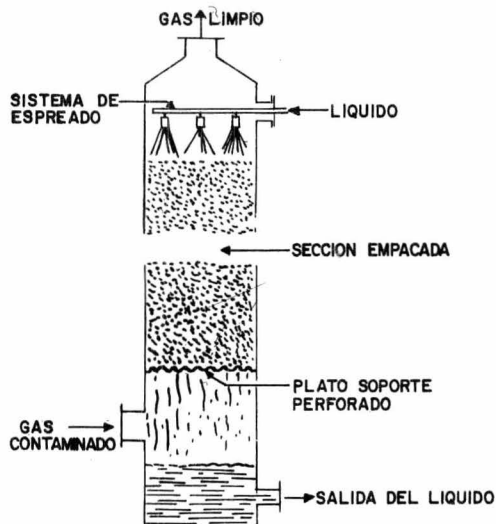
El término Y es la fuerza directriz disponible para la transferencia de masa y es la diferencia entre la Y , la concentración del soluto en el gas, y Y^* la concentración del soluto en el equilibrio correspondiente a la composición actual del líquido. En el caso más favorable, mediante una reacción química irreversible, Y^* tiende a cero.

La expresión para la fuerza directriz se encuentra mejor caracterizada en un diagrama X, Y , donde se establece la concentración del soluto en la fase gaseosa y en la fase líquida por medio de un balance de masa, y en donde se representa la relación en el equilibrio de la concentración del gas y del líquido.

Para gases disueltos, con un solvente relativamente no volátil, la línea de operación AB , es una línea recta. La línea de equilibrio, representa un gas parcialmente soluble, siendo relativamente recta a



PARAMETROS QUE SE USAN PARA EL CALCULO EN UNA OPERACION DE ABSORCION



TORRE EMPACADA PARA LA ABSORCION DE GASES CONTAMINANTES

bajas concentraciones. La fuerza directriz para el caso donde controla la película del gas es en $Y - Y^*$.

Una aproximación conveniente para especificar el desarrollo de una unidad, se basa en el concepto de transferencia unitaria. El número de unidades de transferencia que se requieren en el caso de un gas disuelto está dado por:

$$N_{OG} = \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*}$$

La altura del empaque que se requiere para un plan específico es:

$$h = \frac{G_M}{K_G A P} N_{OG}$$

donde

h = Altura del empaque en pies

G_M = Velocidad del gas, basada en la sección transversal de la torre, en lb Mole / (hr) (pies²)

$K_G A$ = coeficiente de transferencia de masa, en lb mole / (hr) (pies²) (atm.)

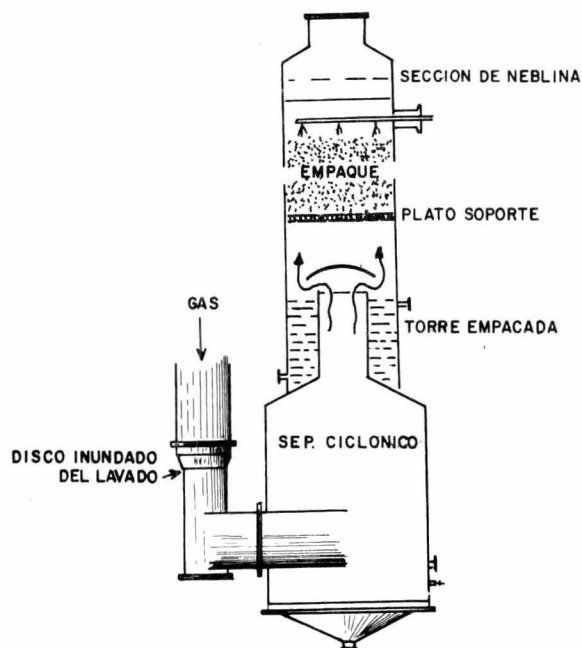
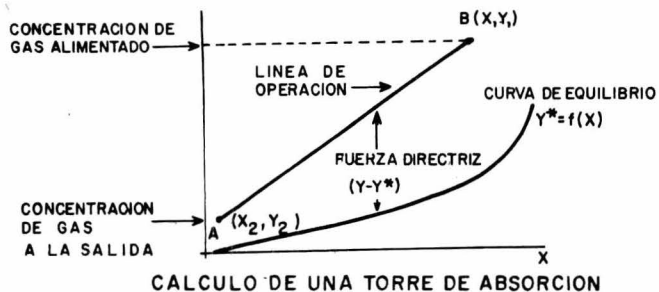
P = presión total, en atm.

Para el caso de que la presión sea cero (la solución es un medio reactivo, de oxidación etc.)

$$N_{OG} = \ln \frac{Y_1}{Y_2}$$

En este caso, una sola unidad se transfiere al eliminar el 63% del soluto. Se necesitan tres unidades de transferencia para eliminar el 95% del soluto.

Torres empacadas y torres de platos.— Ambas, son los tipos más comunes de absorbedores de gases, siendo el primero es mas co-



INSTALACION COMBINADA DE UN LAVADOR CON UNA TORRE EMPACADA

mún en el control de la contaminación atmosférica. La torre de platos se utiliza cuando los problemas inherentes a la distribución en las grandes torres empacadas, llegan a tener importancia. La torre de platos se usa también cuando se quiere un enfriamiento, o cuando se requieren que las relaciones del líquido sean muy grandes. La torre empacada es adecuada para aplicaciones corrosivas, operaciones con baja caída de presión y para operaciones a pequeña escala.

Torre empacada típica.— La unidad consiste de una coraza cilíndrica, una sección empacada sobre un plato soporte, un distribuidor de líquido un redistribuidor del líquido, un acceso para limpieza, entradas y salidas del gas, y para los casos donde se desea una recirculación del líquido se tiene un resumidor con una bomba de recirculación provocando que se inunde la torre.

Empaque.— En el pasado, el material típico era roca desquebrada. En la actualidad se dispone de materiales sofisticados y poco costosos, que permiten manejar gastos elevados de gas y de líquido sin tener una caída de presión excesiva y son consistentes al tener buenos resultados de absorción del gas.

Los materiales con que se construye el empaque puede ser cerámica, carbón, metal, plástico y madera. Los más comunes son los anillos Rasching y Pall, sillas Berl e Intalox y rejillas de baja caída de presión.

Eliminación de partícula y absorción del gas en combinación.— Varios procesos emiten materia particulada y gases nocivos simultáneamente. En este caso, una solución económica para el control de la contaminación atmosférica, es una combinación de un lavador de gran energía con una torre empacada de baja energía. La gran energía del disco lavador inundado hace posible una acción de lavado por medio de la atomización del medio del lavado en pequeñas gotas dentro de un área cónica variable. El nivel de ejecución se puede mantener relativamente fijo con respecto a el flujo del gas, manteniendo una caída de presión constante a través de la unidad.

Además de eliminar la partícula en el lavador es de considerarse la absorción por medio de gotas solventes finamente divididas. Cuando se requiere una absorción de gas adicional, se recurre a una torre empacada adicional.

Las torres empacadas de acero templado para aplicaciones del control de la contaminación atmosférica, cuestan de \$12.50 a \$62.50 por scfm.

[Combustión.—

Flama.— Muchos procesos producen fumarolas, las cuales al recuperarlas no tienen valor debido a su complejidad o a la naturaleza inherente del material. Por lo cual no es conveniente efectuar una adsorción o absorción, sin embargo las fumarolas pueden dar origen a una combustión, ser peligrosas a la salud o bien constituir un olor nocivo. Cuando las fumarolas contienen un material combustible se acostumbra incinerarlas a la flama ocasionando que la materia orgánica se reduzca a dióxido de carbono y agua. Los compuestos de azufre se convierten en dióxido de azufre.

En la mayoría de casos de contaminación atmosférica la concentración de combustibles en la corriente gaseosa esta por debajo del límite mínimo de flameabilidad.

Se debe quemar un combustible auxiliar para calentar las fumarolas hasta alcanzar temperaturas elevadas y con un adecuado tiempo de reacción para que haya una combustión completa, porque los productos que se forman en una oxidación parcial. Son indeseables dentro de la corriente gaseosa. El incinerador de flama, por sus propias condiciones, son efectivos para eliminar aerosoles y gases combustibles de las corrientes de salida con lo cual se incrementa la visibilidad en la vecindad de la chimenea, reduce los olores, elimina los componentes tóxicos y elimina los peligros de explosión. En muchos casos, se han obtenido eficiencia de 90% o más.)

Para una eliminación completa de ciertos componentes existe una variación considerable de la temperatura en la zona de combustión. El rango de temperaturas, más representativo para una buena combustión es de 1200 a 1500°F. Una combustión eficiente, depende sobre todo de (1) un consumo adecuado de oxígeno, (2) que la mezcla de los gases contaminados con la flama sea bastante completa, (3) una temperatura adecuada en la zona de combustión y (4) un tiempo de contacto suficientes en la zona de combustión.

Por lo general, el abastecimiento del suficiente oxígeno para la combustión es un pequeño problema, debido a que los niveles de este combustible en el aire son bajos.

Las ventajas de esta técnica para abatir la contaminación atmosférica son, su simplicidad, su alta eficiencia y su relativa insensibilidad a la composición del contaminante. Con respecto a esto último, los contaminantes más resistentes requieren mayor exposición, es decir mayor tiempo de contacto. Por lo general el tiempo de contacto en la zona de combustión varía de 0.3 a 0.5 segundos, con temperaturas alrededor de los 1500°F.

Los incineradores de flama operan con baja caída de presión y requieren poco mantenimiento, siempre y cuando hayan sido construídos adecuadamente. El principal costo de operación es el del combustible que se requiere para tener temperaturas aproximadas a los 1500 °F.

En aquellos casos donde existe una considerable variación en el flujo de la corriente contaminada, se recomienda instalar controles que modulen el quemado, con el objeto de mantener constante la temperatura dentro de la cámara de incineración.

Las operaciones de cocido y curado usadas en tintas pinturas y recubrimientos de pisos por lo general producen atmósferas que contienen solventes, que se eliminan, incinerándolos a fuego directo.

Los costos de las unidades de incineración son aproximadamente de \$65.00 a \$130.00 por acfm (instalados).

Combustión catalítica. Algunas emisiones contienen componentes combustibles a bajos niveles de concentración inestables para una combustión directa sin la adición de un valor calorífico considerable.

A menudo esos componentes, están muy poco definidos químicamente, por lo cual no se usa una reacción química directa por absorción. La combustión catalítica es una técnica en la cual se convierten los componentes en dióxido de carbono inofensivo y agua.

Para llevar a cabo una oxidación sobre un catalizador se necesita que la temperatura de ignición sea más baja que en un proceso de combustión, es posible en muchos casos reducir altamente las concentraciones del contaminante sin cargas excesivas.

La base para el proceso catalítico es un catalizador metálico, distribuido sobre un soporte inerte. Durante la reacción, se lleva una adsorción momentánea de una molécula de gas orgánico sobre la su-

perficie activa del catalizador; el oxígeno se adsorbe para formar un complejo activo óxido — metálico cuya naturaleza depende del catalizador metálico que se usa. El oxígeno se transfiere a la molécula orgánica y la molécula se libera como dióxido de carbono y agua.

Requisitos del proceso.— El proceso requiere de un contaminante combustible en concentraciones menores de su nivel más bajo de explosividad (LEL). Por lo general, para mayor seguridad, las concentraciones de operación se mantienen por debajo del 25 al 50 % de el LEL.

La cinética de la reacción catalítica para la concentración del contaminante y el tiempo de exposición, indica una temperatura de 50° a 100°C, con lo cual la combustión del contaminante se incrementa del 10 a más del 90%. El rango de temperatura varia con la reactividad del contaminante.

Por lo general, el tiempo de contaco, como tal, no se especifica, más aún, es más útil especificar el espacio velocidad, el número de volúmenes de gas tratados por medio de una unidad volumétrica del lecho catalítico por hora.

Catalizadores.— La mayoría de ellos son metales platinados, que son sumamente activos en presencia del oxígeno; bajo la mayoría de las condiciones, poseen buena estabilidad térmica y resistencia a los venenos. Otros metales necesitan grandes temperaturas de reacción y son menos usados.)

Temperatura de control. En algunos casos una corriente de gas caliente, no requiere precalentador, pero por lo general, es necesario un quemador auxiliar para mantener la temperatura del catalizador.

En algunos sistemas, la concentración de los vapores combustibles se limita a una concentración predeterminada por medio del uso de un analizador de gas, que muestrea el gas y lo controla en un medidor en la entrada de la unidad catalítica. Dentro del sistema puede estar una alarma para calentar cuando se excede la concentración predeterminada. Consta también de un apagador automático cuando alcanza altas concentraciones. Este control se incorpora también dentro del sistema para preveer un sobrecalentamiento del catalizador.

[Envenenamiento.— En general, los catalizadores de platino son relativamente insensitivo a los venenos; sin embargo, algunos tipos de impurezas pueden deactivar el catalizador.

Los compuestos halogenados actúan como supresores de la actividad catalítica; a concentraciones suficientemente bajas, se puede operar con temperaturas incrementadas del catalizador para vencer esa supresión.

El fósforo, arsénico y boro, son venenos químicos para el platino que se encuentra ligado a la superficie catalítica. Su presencia dentro de la corriente gaseosa debe evitarse.

En algunos casos, se deposita carbón sobre la superficie del catalizador. Esto ocurre en períodos de insuficiente precalentamiento de gases que contienen compuestos orgánicos de alto peso molecular o bien, puede ser el resultado de alimentar una cantidad insuficiente de oxígeno. Para limpiar el catalizador es necesario una oxidación cuidadosa, evitando un sobrecalentamiento.)

[Aplicaciones.— Mientras que la oxidación catalítica es la más importante para problemas de contaminación atmosférica, la eliminación de las fumarolas de óxido de nitrógeno, requieren de una técnica de reducción catalítica. La conversión a nitrógeno y a oxígeno se puede afectar. Esta técnica se aplica cuando el efluente contiene bajos niveles de oxígeno, por lo que se necesitan cantidades adicionales de gas reductor por lo general hidrógeno o metano.

Respecto al costo, debido a que los problemas de liberación de calor llegan a ser excesivos al incrementar el contenido de oxígeno, es necesario graduar los lechos catalíticos con interetapas de enfriamiento para evitar perjudicar el catalizador. La técnica de reducción catalítica se practica ampliamente en plantas de producción de ácido nítrico con emisiones óxidos de nitrógeno.]

[Enmascaramiento y Neutralización de olores.—

Para cuando ciertos olores específicos no pueden definirse químicamente o no pueden establecerse, o cuando la incineración o la absorción resultan inefectivas, se utilizan dos tipos de técnicas con cierta efectividad, que consisten en enmascarar o bien neutralizar los olores. El enmascaramiento consiste en envolver un determinado olor desagradable con un olor más fuerte pero agradable.

La neutralización utiliza métodos más viables tales como la selección de un aditivo que neutraliza total o parcialmente el olor ofensivo. Se han usado una gran variedad de técnicas en aplicaciones industriales de enmascarado y neutralización. El enmascarador (el término técnico es Mascarol) puede esparcirse dentro de la base de la chimenea, en donde se aplica en cantidades superiores a 10 ppm hasta un 2%. Es importante tomar en cuenta el tamaño de la gota para evitar un consumo químico excesivo y llevar a cabo una volatilización completa.

También se puede lavar la corriente de gas ofensivo con una solución que contenga un aditivo volátil con un doble propósito, el de eliminar algún componente soluble en agua y el de volatilizar simultáneamente algún antide odorante.

En algunos casos es conveniente introducir el deodorante junto con la materia prima, antes de que ésta se procese.]

[Dispersión.—

Un proceso natural, que en muchos casos es el más eficiente, es el de eliminar los contaminantes arrojándolos a la atmósfera, con lo cual el dióxido de azufre se oxida en trióxido de azufre, para convertirse posteriormente éste, en sulfatos principalmente de calcio. El ácido solfídrico se oxida de una manera similar a sulfatos. Otros procesos químicos y biológicos efectúan la conversión (relativamente lenta) del amoníaco y de las aminas.

Esos procesos naturales dan como resultado, que la concentración de los contaminantes a nivel del suelo posea un valor suficientemente bajo. Para parovechar este efecto, se necesita ventear el gas bajo condiciones apropiadas en una chimenea alta.

Una chimenea consta de dos partes principales; una cubierta exterior y un forro interno. El forro interno se diseña para resistir la temperatura y los constituyentes químicos del gas, la cubierta exterior se diseña para proteger el forro interno de los vientos y del clima y en algunos casos le sirve de soporte. La cubierta exterior es por lo general de ladrillo o de concreto reforzado, sin embargo, en algunas ocasiones es de metal en chimeneas cortas. El forro es de ladrillo generalmente pudiendo ser de acero en chimeneas que sean muy altas.

Los forros de metal están sujetos a la corrosión, en caso de que la temperatura no se mantenga por arriba del punto de rocío, mientras que los ladrillos y los morteros son capaces de resistir cualquier tipo de ataque químico de los vapores condensados.

Efecto de las condiciones atmosféricas.— En gran parte el perfil de temperatura de la atmósfera tiene que ver con el comportamiento de las plumas de la chimenea. Se ha encontrado que la relación del cambio de temperatura para un aire seco ascendente es de 5.5°F a esto se le llama relación de intervalo adiabático. Si existe un gradiente excesivo, el elemento gaseoso continuará elevándose por la chimenea, aumentando la posibilidad de una dilución considerable de éste en la atmósfera.

En algunos casos la temperatura de la atmósfera se incrementa con la altitud, originando una condición llamada inversión. Tal condición trae como consecuencia una estratificación y una reducción de la mezcla. La inversión por lo general dificulta la dispersión de los contaminantes.

Efecto de la topografía.— Los edificios y las colinas pueden llegar a reducir la velocidad del viento y el nivel de turbulencia y consecuentemente ejercer un efecto nocivo en la reducción de las concentraciones de los contaminantes a nivel del suelo.

La predicción del efecto de la topografía sobre la dispersión se nota mejor desde el punto de vista experimental.

Cálculo de la concentración a nivel del suelo. Obviamente es importante predecir para una chimenea dada al nivel de concentración máximo a nivel del suelo de un contaminante determinado.

Se han desarrollado las siguientes ecuaciones para esto, aplicando modificaciones empíricas.

$$H_x = Z_s + (Z_v) X + (Z_d) X$$

donde H_x = altura efectiva de la chimenea en pies.

X = distancia en pies medida downwind, horizontalmente a partir de la base de la chimenea.

Z_s = altura actual en pies

Z_v = velocidad ascendente en pies

Z_d = densidad ascendente en pies.

La velocidad ascendente máxima (Zv) más esta dada por:

$$(Zv)_{\max} = \frac{4.77 (Q_i V_s)^{1/2}}{1 + 0.43 (V_w/V_s) V_w}$$

donde V_w = velocidad del viento en pies por segundo.

V_s = velocidad del gas de salida en pies por segundo.

Q_i = relación de la emisión volumétrica en pies cúbicos por segundo.

La velocidad ascendente actual a una distancia X de la base de la chimenea está dada por:

$$(Z_w)_x = (Zv)_{\max} \left[1 - 0.8 \frac{(Zv)_{\max}}{X} \right]$$

La densidad ascendente (Z_d) está dado por

$$(Z_d)_x = \frac{6.37 g Q_i (T_g - T_{ga}) z}{V_w^3 / T_{ga}}$$

donde g = aceleración debida a la gravedad

T_g = temperatura absoluta del gas.

T_{ga} = temperatura absoluta del gas, a la cual la densidad del gas, sería igual a la densidad atmosférica del aire.

Los valores de Z están referidos a la distancia horizontal (X) por el factor x del dado, experimental de Bosanquet. El factor x se encuentra como

$$x = \frac{V_w X}{3.57 (Q_i V_s)^{1/2}}$$

La concentración a nivel del suelo a una distancia horizontal (X pies) downwind de la chimenea y a una distancia (Y pies) medida por perpendicularmente a la dirección del viento es:

$$(C_o)_{x,y} = \frac{M}{2\pi p q 60 V_w X^2} e^{-\left(\frac{H_x}{P_x} + \frac{Y^2}{2q^2 X^2} \right)}$$

donde C_0 = Concentración a nivel del suelo en un punto dado.

M = relación volumétrica de una descarga contaminante en pies cúbicos por minuto.

p, q = coeficientes de difusión horizontal y vertical de Bosanquet

En esencia, un gas que sale por una chimenea posee una velocidad dada, una densidad y una temperatura. La velocidad y la densidad determinan a que la altura de chimenea sea correcta. El gas llega a mezclarse con la atmósfera y se transporta en dirección downwind. El mezclado se lleva a cabo mediante un mecanismo de difusión mecánica.

Existen varias reglas que son útiles para orientar y que pueden ser usados para la planeación de pequeñas chimeneas. Esas reglas son las siguientes:

- 1.— Las chimeneas deben tener al menos 2 1/2 veces la altura de los edificios vecinos.
- 2.— Las velocidades de expulsión del gas de la chimenea deberán ser mayores de 60 pies por segundo. Las velocidades mayores de 90 pies por segundo pueden erosionar el forro de ladrillo.
- 3.— Los gases que salen de chimeneas con diámetros menores de 5 pies y alturas menores de 200 pies pueden llegar al suelo muy pronto en muy corto tiempo, originando que las concentraciones a nivel del suelo sean excesivas.
- 4.— La difusión atmosférica ocurre por lo general hasta una altura equivalente de 5 a 10 veces la altura de la chimenea.
- 5.— Cuando los gases de la chimenea están sujetos a la difusión atmosférica, las concentraciones a nivel del suelo son del orden de 0.001 al 1% de la concentración dentro de la chimenea, siempre y cuando ésta se haya diseñado apropiadamente.
- 6.— Las concentraciones a nivel del suelo se pueden reducir más, usando chimeneas más altas. La concentración en el suelo varía inversamente al cuadrado de la altura efectiva de la chimenea.

Los costos de una chimenea varían ampliamente con la localización geográfica, el gas y otras condiciones y la altura (el costo por pies de altura aumenta al incrementar la altura por un

factor de 1.25 a .15 por unidad que se aumente). Un costo aproximado de chimeneas con forros estandares de 8 pies de diámetro interno y de 200 a 400 pies de altura, es de \$ 6,300.00 a \$ 12,500.00 por pie de altura.

Determinación de Requisitos.—

Como un mínimo absoluto, para colectores de partículas, deberán definirse:

La relación de flujo volumétrico de los gases.

La temperatura, presión y humedad del gas.

La forma (mojada o seca) y concentración de la partícula.

La distribución de tamaño y gravedad específica de la partícula.

La resistividad eléctrica de la partícula.

La eficiencia de eliminación deseada.

Las restricciones del proceso sin tener en cuenta el uso del agua.

La selección del equipo óptimo necesita un análisis detallado de varias técnicas adicionales y de factores económicos. Por lo que la solución óptima depende nominalmente de factores económicos tales como:

1.— Capital de inversión.

a) Colector base.

b) Auxiliares tales como ventiladores, bombas, controles, chimeneas, colectores del desperdicio y tratamiento de aguas.

2.— Costos de operación.

a Agua.

b Energía eléctrica.

c Mantenimiento.

d Costos químicos.

3.— Costos del capital.

a Intereses.

b Impuestos.

c Amortización.

C A P I T U L O V I

CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA
EN LA INDUSTRIA QUIMICA.

La industria química se caracteriza por la gran diversidad de productos químicos, procesos y desperdicios. A partir de la Segunda Guerra Mundial, esta industria se ha diversificado en tal forma, que se muy difícil el clasificarla apropiadamente.

El aspecto que más complica el control de la contaminación en la industria química, es que ésta cambia constantemente, al usar diferentes materias primas, nuevos procesos y produciendo nuevos productos.

En muchos casos el proceso y sus desperdicios son únicos y los sistemas para combatir la contaminación se estudian individualmente, sin embargo, muchos procesos no tienen desperdicios.

En este capítulo se tratarán los principales procesos dentro de la industria química, desde el punto de vista de contaminación atmosférica, sus emisiones a la atmósfera y las principales soluciones para abatirla o en su defecto disminuir dichas emisiones a niveles aceptables.

Métodos Generales de Control.—

Los criterios que se aplican en la manufactura química para controlar la contaminación atmosférica son en la mayor parte la aplicación diaria de las operaciones unitarias dentro de la ingeniería química, usando colectores mecánicos, filtros de bolsas, precipitadores electrostáticos, colectores húmedos, unidades catalíticas de oxidación y reducción e incineradores de flama directa o absorbedores, todos estos solos o en combinación.

La selección del mecanismo de control para un proceso particular, está en función del grado de control necesario, de la naturaleza del efluente, del capital y costo del equipo de control, del efecto del sistema de control sobre el proceso mismo, de la confianza y de la máxima disponibilidad del material de desperdicio colectado.

Acidos Minerales.—

Acido sulfúrico.— Todo el ácido sulfúrico que se produce, se fabrica por el proceso de cámara o por contacto. Durante los últimos años se han incrementado el número de plantas de contacto, mientras que el número de plantas de cámara ha disminuído.

Proceso de Cámara.— La fuente primaria de emisiones en este proceso es la torre Gay-Lussac. Estas emisiones incluyen óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y niebla de ácido sulfúrico.

Las concentraciones de dióxido de azufre en estos gases de salida son de 0.1 a 0.2% en volumen. Las concentraciones de los óxidos de nitrógeno son del mismo rango. Entre el 50 y 60% del total de los óxidos de nitrógeno es dióxido de nitrógeno, al cual se debe el color café rojizo de los gases de salida.

La niebla de ácido sulfúrico en los gases de salida varía de 5 a 30 mg/pie cúbico. La niebla de ácido sulfúrico contiene alrededor del 10% de óxido de nitrógeno disuelto. Más del 90% de las partículas de la niebla son mayores de 3 micras de diámetro. La pérdida en la niebla de ácido en los gases de salida varía con el diseño de la torre Gay-Lussac. Estas pérdidas son, por lo general, mucho menos del 0.1% del ácido que se produce.

Rara vez se usa equipo de recuperación para los contaminantes en los gases de salida de la torre Gay-Lussac. Sin embargo, el lavar con agua los gases de salida, reduce el dióxido de azufre en un 40% y los óxidos de nitrógeno en un 25%.

Proceso por contacto. La mayor fuente de emisiones en plantas de ácido sulfúrico por contacto son los gases de salida del absorbedor. Esta corriente gaseosa es principalmente, de nitrógeno y oxígeno pero también contiene dióxido de azufre sin reaccionar, trióxido de azufre que no fue absorbido, niebla y aerosol de ácido sulfúrico. Cuando estos gases llegan a la atmósfera, el trióxido de azufre se hidrata con la humedad atmosférica teniendo entonces niebla de ácido sulfúrico que forma una pluma blanca visible con tono azulado.

La principal emisión es el dióxido de azufre en la salida de la chimenea del absorbedor. La conversión catalítica de dióxido de azufre a trióxido de azufre nunca es completa por lo cual se descarga algo de dióxido de azufre.

La mayoría de las plantas de contacto están diseñadas con una eficiencia de conversión de 96 a 98%.

La concentración del dióxido de azufre en los gases de salida está en función de la concentración inicial del dióxido de azufre de

los gases que entran al convertidor y de la eficiencia del catalizador. Las concentraciones del dióxido de azufre en los gases de descarga del absorbedor son de 0.13 a 0.54%.

El equipo para eliminar éstas concentraciones relativamente bajas de dióxido de azufre liberado, no es factible económicamente, y lo que generalmente se hace es darles salida en chimeneas altas para que la difusión en la atmósfera pueda diluirlos a niveles aceptables.

En Alemania, una planta que utiliza el proceso por contacto, ha reducido la concentración del dióxido de azufre a la salida hasta un 0.10 a 0.03%.

El proceso consiste en agregar una torre de absorción intermedia y un cambiador de calor en la última etapa de conversión. En este punto, la conversión del trióxido de azufre tiene una eficiencia de 99.7%.

Las nieblas de ácido sulfúrico son el resultado de la presencia de vapor de agua, al procesar los gases alimentados en el convertidor. Las torres de secado de la mayoría de las plantas de contacto son capaces de secar el aire o el dióxido de azufre hasta una humedad de 3 mg/pie cúbico estandar. La humedad restante se combina con el trióxido de azufre después del convertidor cuando la temperatura alcanza el valor del punto de rocío del trióxido de azufre. La niebla de ácido que se forma es difícil de eliminar en el absorbedor y gran parte de ésta sale a la atmósfera.

Las nieblas se pueden formar también, a partir del agua que se produce en la combustión de las impurezas orgánicas del azufre. El azufre oscuro puede contener más del 0.5% de materia orgánica y producir más niebla de la combustión de la materia orgánica que por la humedad en el aire seco.

Sin humedad en los gases de entrada, es posible que se formen nieblas en la torre de absorción, debido a una gran velocidad del gas o a un enfriamiento rápido.

La niebla de ácido en el gas de descarga del absorbedor, varía de 1.1 a 48.8 mg/pie cúbico est., teniéndose como promedio un valor de 12.9 mg.

La concentración de la niebla de ácido sulfúrico, se puede reducir con el uso de precipitadores electrostáticos, filtros de fibra de vidrio, tamices y limpiadores de gas con empaque de teflón. Cuando se diseña para obtener una alta eficiencia, los eliminadores de fibra de vidrio y los precipitadores electrostáticos, determinan un alto grado de recuperación, con eficiencias que se encuentran en un rango de 92 a 99.9%. Los eliminadores de dos etapas de tamiz demuestran buenos resultados con 92% de recuperación, cuando las partículas de niebla de ácido tienen un diámetro mayor a los 3 micras pero substancialmente se obtienen resultados muy inferiores cuando la proporción de partículas de menor tamaño es mayor.

La eficiencia reportada del lavador empacado con tiblón es de 98.9 a 99.6% cuando el 60% de las partículas de la niebla poseen un diámetro menor a los 3 micras. La caída de presión a través del colector se ha visto que se encuentra entre las 8 y 10 pulgadas manométricas de agua.

Se reduce en su mayor parte el contenido de ácido en el efluente de la chimenea, por condensación y aglomeración, tanto que a 250 pies de la chimenea, la concentración de la niebla se ha reducido en un 91% resultando una concentración a la salida de 2.5 mg/pie cúbico est.

Acido nítrico.— La mayor parte de ácido nítrico se fabrica comercialmente por una oxidación a alta temperatura de amoníaco con aire con catalizador de platino para formar óxido nítrico, que a su vez se oxida para formar el dióxido de nitrógeno que se absorbe en agua para producir una solución acuosa de ácido nítrico. Generalmente se pueden usar los siguientes tipos de plantas: de 0 a 10 psig: intermedia de 20 a 60; de alta presión de 80 a 120 psig.

Los gases de salida de la torre de absorción que contienen óxidos de nitrógeno no absorbidos, son la fuente contaminante. Estos óxidos en su mayor parte, se encuentran como óxido nítrico y dióxido de nitrógeno, sin embargo, existen cantidades pequeñas de ácido nítrico en suspensión como niebla. Esta mezcla de gases tienen una coloración café rojiza debida al dióxido de nitrógeno, el óxido nítrico no posee coloración alguna.

Si contienen menos de 0.03% de dióxido de nitrógeno, esencialmente son incoloros pero en concentraciones de 0.13 a 0.19% en volumen, producen un color bien definido en la pluma de la chimenea.

En estudio hecho recientemente se ha visto que hay una emisión en un rango de 0.1 a 0.69 con un promedio de 0.37% en volumen.

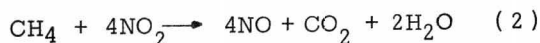
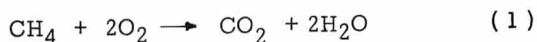
La composición típica de estos gases del proceso de alta presión es como sigue:

Oxidos de nitrógeno totales (NO+NO ₂)	0.3 %
Oxígeno	3.0 %
Agua	0.7 %
Nitrógeno, y demás	96.0 %

La emisión de los óxidos de nitrógeno se ve reducida comúnmente por una reducción catalítica con algunos combustibles y ocasionalmente por absorción.

Reducción.— La reducción catalítica es particularmente conveniente para el proceso de oxidación del amoníaco a presión porque los últimos gases son de una composición baja y uniforme y estando a presión pueden recalentarse por medio de un cambiador de calor hasta la temperatura de ignición necesaria.

Los últimos gases del absorbedor se calientan hasta la temperatura de ignición necesaria, mezclándolos con combustible tal como hidrógeno o metano o una mezcla de ambos, pasando sobre un lecho catalítico de platino o paladio. Las reacciones son:



Las reacciones (1) y (2) ocurren rápidamente y generan una cantidad considerable de calor, el cual puede recuperarse económicamente. Los gases finales son en esta parte incoloros, debido a que el dióxido de nitrógeno se convierte en óxido de nitrógeno. La reacción del combustible adicional con el óxido nítrico es la reacción (3), la cual se efectúa con más lentitud. Cuando es completa esta reacción, se tiene un abatimiento total.

El costo de una unidad de reducción catalítica, incluyendo el catalizador, varía de \$15.00 a \$30.00 por scfm de gas final. Depen-

diendo de la cantidad de vapor que se produzca y de los costos del combustible, los sistemas podrán recuperar una parte substancial de capital de costo.

El vapor se puede usar como vapor de proceso o bien puede utilizarse produciendo energía para manejar la compresora en una planta de ácido nítrico.

El calor que se genera en la oxidación del amoníaco y de la unidad de reducción catalítica proporciona toda la energía que se requiere para manejar la compresora de aire.

En una instalación comercial, el amoníaco se usa como combustible en la reducción catalítica de los óxidos de nitrógeno. Las temperaturas a través del reactor catalítico son muy bajas, debido a que la selectividad del amoníaco reduce los óxidos de nitrógeno sin que haya reacción simultánea con el oxígeno en los gases finales. Se utiliza catalizador de platino soportado en cerámica.

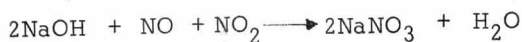
Las reacciones son:



Estas reacciones se llevan a cabo dentro de un rango de temperatura de 410 a 520 °F. Por debajo de los 410 °F, es posible que se forme nitrato de amonio; por encima de 520 °F se forman óxidos de nitrógeno al oxidarse el amoníaco.

Absorción. Los absorbedores de agua no son mecanismos de control muy efectivos debido a que las corrientes finales del gas representan el afluente de sistemas de absorción acuosa y las concentraciones de los óxidos de nitrógeno son demasiado bajas para una absorción eficiente.

La absorción en soluciones alcalinas es más efectiva que en agua. Con las composiciones propias de la corriente alimentada, las sales nitrato y nitrito se pueden formar de la siguiente forma.



Un sistema alternativo de lavado utiliza dos etapas; con agua en la primera etapa y con hidróxido de sodio en la segunda. Se ha reportado una reducción de óxido de nitrógeno en un 91% con una concentración a la salida de 0.03% de óxido de nitrógeno. Con el lavado, usando solución de carbonato de sodio se reporta una eficiencia del 94% con una concentración de descarga del 0.15% de óxido de nitrógeno.

Acido Fosfórico.—

El ácido fosfórico, comercialmente se produce por dos métodos, por el proceso del horno eléctrico y por proceso húmedo.

Proceso del horno eléctrico.— En este proceso, el fósforo elemental se produce a partir del mineral de fosfato, coke, y sílice en un horno eléctrico. El ácido fosfórico se produce al quemar fósforo con aire para formar pentóxido de fósforo el cual se enfría y se hace reaccionar con agua para formar ácido ortofosfórico.

La recuperación de ácido fosfórico no se pueden realizar de una manera práctica por quemado de fósforo y burbujeando el pentóxido de fósforo resultante a través tanto de agua o ácido fosfórico diluido. Cuando el vapor de agua está en contacto con una corriente de gas conteniendo un anhídrido volátil, tal como el pentóxido de fósforo, se formará una niebla ácida, consistente en partículas líquidas de varios tamaños, casi instantáneamente. Una investigación reciente, indica que el tamaño de las partículas de la niebla del ácido fosfórico es pequeño, de 2 micras o menor; al diámetro medio de la masa es de 1.6 micras, dentro de un rango de 0.4 a 2.6 micras.

Para este tipo de proceso existen cinco tipos de equipos de colección de niebla: torres empacadas, precipitadores electrostáticos, lavadores tipo venturi, filtros y contractores de red de alambre. La selección del tipo de equipo de control se determina por el deseo (o requisición) de la eficiencia de colección, de los materiales de construcción, de la caída de presión a través del mecanismo de control y de los costos de inversión y operación. Lo práctico es tender hacia un equipo de control con muy grandes eficiencias.

Las torres empacadas con anillos Rasching o coke se han usado por varios años. La niebla que producen los gases está en contra-

corriente dentro de la torre empacada con agua o con ácido diluido. Aquí se tiene una eficiencia de un 90% con una velocidad superficial de 6.5 pies por segundo.

Eficiencias de 98% o mayores se obtienen por medio de torres empacadas con una o dos torres más adicionales o bien con filtros adicionales. La caída de presión total a través del sistema es aproximadamente de 30 pulgadas de agua. El lavador en húmedo debe de estar uniforme y completamente mojado y tener una distribución uniforme del gas para que se obtenga una eficiencia de colección alta. Para los filtros se recomienda una buena distribución del gas y una velocidad superficial del mismo, menor de 100 pies por minuto.

En algunos lugares se usan precipitadores electrostáticos para reducir las emisiones de niebla ácida. El principal problema de los precipitadores es la corrosión, el cual se ha resuelto parcialmente al reducir la temperatura de los gases finales entre los 135 y 185 °F, estas temperaturas relativamente bajas dan como resultado una gran recuperación de niebla de la corriente gaseosa. La cantidad de ácido perdido es de aproximadamente 0.15% del pentóxido de fósforo cargado en la cámara de combustión como fósforo.

El usar dos precipitadores electrostáticos en serie de aproximadamente una eficiencia de 99.15%. La velocidad superficial del gas a través del precipitador electrostático es de 6.8 pies por segundo.

El lavador tipo venturi es poco usado para la colección de niebla. La caída de presión a través de este lavador es de 25.2 pulgadas de agua y 1.9 pulgadas de agua en el separador principal. Con caídas de presión de 40 pulgadas de agua se han obtenido eficiencias de 98.4%.

El lavador tipo venturi se utiliza particularmente en plantas que queman lodos para producir ácido. Estos lodos son una emulsión de fósforo, agua y sólidos transportados en la corriente del gas desde el horno eléctrico, tales como polvos o materiales volátiles. Estas impurezas varían de 15 a 20%

El lavador tipo venturi es capaz de coleccionar efectivamente la niebla del ácido y los polvos provenientes de la salida del hidratador.

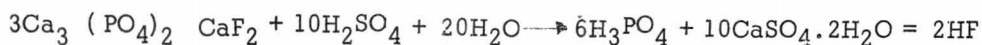
Existe un colector que consta de dos alambres enrollados conectados en serie; el primero, aglomera las partículas finas de niebla ácida en grandes partículas, las que son colectadas en una segunda etapa y se separan de la corriente del gas. La velocidad superficial del gas a través del mecanismo de control varía de 15 a 29 pies por segundo, dando como resultado una caída de presión entre 21 y 42 pulgadas de agua.

Caída de presión, en pulgadas de agua	Concentración de ácido granos / pie ³ de ácido fosfórico		Eficiencia %
	Entrada	Salida	
39.8	48.7	0.0167	99.965
39.8	53.8	0.0133	99.975
41.9	71.7	0.0108	99.985

El costo de este equipo es de \$185.00 por pie cúbico de gas limpio.

Proceso humedo.- La producción de ácido fosfórico por vía húmeda es por medio de reactivos pulverizados, al beneficiar el mineral de fósforo con ácido sulfúrico para formar sulfato de calcio y ácido débil (que contiene 32% de pentóxido de fósforo) se concentra en evaporadores hasta obtener un ácido que contenga un 55% de pentóxido de fósforo. La reacción del mineral de fósforo, generalmente fluo-

ropatita de fórmula $\text{Ca}_{10} (\text{PO}_4)_6 \text{F}_2$, con el ácido sulfúrico es:



Acido Fluorhídrico.-

El ácido fluorhídrico se hace reaccionar con dióxido de silicón en roca de fosfato, para producir gas de tetrafluoruro de silicón.

Los fluoruros gaseosos se liberan en el filtrado y en el concentrador de ácido.

La concentración del ácido por vía húmeda se lleva a cabo en evaporadores al vacío dentro de equipos de combustión o bien en equipos de evaporación a fuego directo. Las emisiones de los evaporadores al vacío se controlan con un condensador barmétrico o bien con un lavador.

Los métodos de contacto directo a temperaturas elevadas no tienen el problema de corrosión en los tubos del evaporador. Sin embargo, el equipo a fuego directo genera una pluma densa de niebla de ácido fosfórico contaminada con ácido fluorhídrico y tetrafluoruro de sílice, ambos se pueden eliminar al usar ciertos tipos de fibras que eliminan ambos contaminantes.

Al preparar el mineral de fósforo se generan polvos, tanto en las operaciones de secado como en las de molienda. Estos polvos generalmente se controlan por medio de una combinación de ciclones y lavadores en húmedo. El material se colecta en los ciclones y se recircula a los lavadores para ser depositado posteriormente en recipientes de desperdicio. Los tipos más usados son simples torres rociadoras y lavadores en húmedo tipo ciclónicos.

Acido clorhídrico.— La producción de ácido clorhídrico que comercialmente se conoce como ácido muriático, puede ser bajo tres tipos principales de procesos: haciendo reaccionar sal común con ácido clorhídrico y sulfato de sodio (procesos Mannheim); quemando cloro con un ligero exceso de hidrógeno; y como subproducto de la clorinación de compuestos orgánicos.

El proceso cloro — hidrógeno se usa en lugares donde se dispone de cloro e hidrógeno como subproductos de algunas plantas cercanas. El cloro se quema con un ligero exceso de hidrógeno, para producir el ácido clorhídrico. Se tienen una cámara de combustión, un quemador de cloro, mecanismos necesarios para el control y seguridad y de equipo para procesar el ácido clorhídrico. Si el gas de cloruro de hidrógeno es deseado en el proceso, se incluye un equipo de enfriamiento de gas para reducir la temperatura de 2200 °F.

Cuando el ácido clorhídrico se produce como subproducto de reacciones de cloro con compuestos orgánicos, los productos de la reacción se alimentan a un condensador para separar los productos orgánicos del ácido clorhídrico, de esta forma se obtiene en forma gaseosa.

Pero si se quiere en forma acuosa se añade un equipo de absorción. Este ácido por lo general se encuentra contaminado con impurezas orgánicas por lo cual requiere depurificaciones posteriores.

El cloruro de hidrógeno en su forma gaseosa se combina rápidamente con agua por lo que su solubilidad es grande. Su solución en agua genera una considerable cantidad de calor, motivo por el cual debe disponerse de un sistema adecuado de enfriamiento.

Para la absorción puede utilizarse un sistema de torre empacada por el cual circulan los gases finales. Se ha visto que la torre de absorción a enfriamiento es la más eficiente y compacta que el sistema de torre empacada. Los diseños comerciales incluyen torres empacadas y encaquetadas y de flujo a contracorriente.

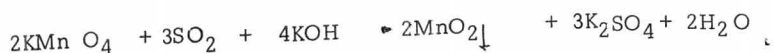
Gases inorgánicos.—

Dióxido de Azufre.— La principal fuente de emisión de dióxido de azufre en la industria química son los residuos del combustible en hornos, en las plantas productoras de ácido sulfúrico y en aquellas que usen azufre en su proceso. La concentración de dióxido de azufre debida a la combustión del combustible en los gases de desecho en una planta de ácido sulfúrico y en los gases de la chimenea es baja.

En esa circunstancia la recuperación económica y la eliminación del dióxido de azufre son difíciles, por lo cual sólo existen unas cuantas instalaciones para eliminar dichas concentraciones.

En general, cuando la concentración del dióxido de azufre en la salida es menor del 1%, se usan chimeneas altas para dispersar el dióxido de azufre tomándose como resultado niveles aceptables de concentración de éste en el suelo.

Las bajas concentraciones en corrientes gaseosas pueden lavarse con solución alcalina de permanganato de potasio amortiguada con carbonato de sodio mediante la reacción:



Acido sulfhídrico.— El ácido sulfhídrico se produce principalmente en las operaciones del refinado del petróleo, en el coquizado del carbón en la purificación del gas natural y en la evaporación del licor

negro en el proceso de pulverizado Kraft. En muchas de estas operaciones se elimina el ácido sulfhídrico, utilizándose ya en algunas plantas el proceso de recuperación. En proceso de recuperación, el ácido sulfhídrico colectado se convierte en dióxido de azufre, para producir posteriormente ácido sulfhídrico o azufre elemental.

Las corrientes pequeñas de ácido sulfhídrico diluido pueden quemarse a fuego directo. Al quemarlo se tiene que tener en cuenta que el ácido sulfhídrico tienen un límite bajo de explosividad de 4.3% y que el producto final será dióxido de azufre que es otro contaminante atmosférico.

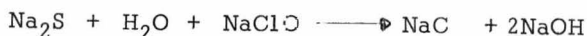
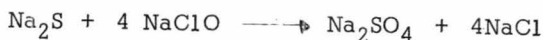
Recientemente se han utilizado sistemas de oxidación catalítica para eliminar el ácido sulfhídrico y otros sulfuros olorosos; los niveles requeridos para una máxima eficiencia es cuando se calientan 300 cfm del gas oloroso de 160 °F a 950 °F, mediante esto se oxidan los gases y se hacen pasar a través de un lecho catalítico de platino — alúmina.

Después del cambiador de calor, los gases de salida se lavan con agua. El eficiente de lavador queda libre de olores.

El costo de este sistema es de \$95,000.00. El lecho catalítico se renueva cada nueve meses con un costo de \$8,500.00

El sulfuro de hidrógeno es un gas ácido reductor bajo condiciones normales y puede ser neutralizado u oxidado. La reacción oxidante con ácido sulfhídrico forma el sulfato, si el pH es 7 o menor, y tionatos, sulfitos, azufre o sulfatos a pH 7 o mayor dependiendo del oxidante usado y de la concentración de los reactivos.

Si la solución oxidante contiene cloro, las ecuaciones son las siguientes.



Las soluciones de hipoclorito a un pH de 12 o mayor son bastante efectivas para eliminar el ácido sulfhídrico de la corriente gaseosa,

mientras que las soluciones hipoclorosas ácidas tienen una pobre eficiencia de absorción respecto a las soluciones hipoclorosas básicas.

El ácido sulfhídrico se oxida virtual y cuantitativamente a sulfato con soluciones alcalinas de permanganato. Los procesos de lavado son útiles para eliminar otros compuestos de azufre que puedan estar presentes con el ácido sulfhídrico.

El hidróxido de sodio reacciona con el ácido sulfhídrico en soluciones acuosas observándose las siguientes reacciones de neutralización.



El ácido sulfhídrico permanece en fase líquida como hidrosulfuro de sodio o como sulfuro de sodio, siempre y cuando exista una suficiente cantidad de hidróxido. Debe tenerse cuidado en el manejo de la solución canónica utilizada ya que contiene sulfuros. Una subsecuente acidificación de esta solución libera ácido sulfhídrico en peligro de la salud o bien ocasionando problemas de explosión.

En operaciones de este tipo intermitentes, a bajas concentraciones de ácido sulfhídrico, el óxido de fierro es útil en el proceso. El gas a tratarse pasa a través de un lecho de óxido de fierro esponjoso, que por lo general consiste en madera pulida impregnada con el óxido de fierro. El ácido sulfhídrico reacciona con el óxido de fierro para formar sulfuro de fierro. Después se quita el lecho y la esponja se reemplaza o se trata con aire para regenerar el óxido de fierro y formar azufre elemental.

Oxidos de nitrógeno.— El óxido nítrico NO, y el dióxido de nitrógeno NO₂ son las formas más comunes de óxidos de nitrógeno que se emiten de los procesos industriales. Dentro de la industria los óxidos de nitrógeno se encuentran en pequeñas cantidades en los gases de salida de plantas productoras de ácido nítrico, en los procesos de nitración, en plantas productoras de ácido sulfúrico que utilizan el método de cámara en plantas intermediarias para obtener nylon, en las reacciones de oxidación que usen nitratos y en los procesos de combustión.

Respecto a los sistemas de control, se han obtenido eficiencias de colección del 50 al 85% al usar sistemas de colección de dos etapas. La primera etapa consta de una torre empacada con anillos Rasching por la que circula una solución de hidróxido de sodio y de amoníaco de desperdicio.

Se forma nitrato de amonio, el que produce una pluma densa de color blanco. Estas partículas se eliminan en una segunda etapa por medio de un lavador tipo Venturi que trabaja a una presión de 22 pulgadas de agua.

Se necesitan grandes cantidades de agua para absorber el dióxido de nitrógeno en concentraciones menores de 2000 ppm. En temperaturas por debajo de los 100 °F, no es apreciable la diferencia en la absorción entre soluciones de hidróxido de sodio al 20% y agua pura.

La adsorción de los óxidos de nitrógeno por medio de gel de sílice o por carbón activado, resulta satisfactoria para el dióxido de nitrógeno en concentraciones al 0.1% y para el óxido nítrico en concentraciones entre 1 y 1.5%. La gel de sílice que contiene el dióxido de nitrógeno adsorbido cataliza la oxidación del óxido nítrico y el dióxido de nitrógeno resultante se elimina por la adsorción sobre la gel de sílice. La gel de sílice genera periódicamente con calor, produciendo una gran concentración del dióxido de nitrógeno, el cual puede utilizarse en una planta productora de ácido nítrico. Este método no se puede usar comercialmente para reducir los óxidos de nitrógeno.

Fluoruros Gaseosos. Los contaminantes fluorados se emiten a la atmósfera en una gran variedad de procesos industriales en los que se producen compuestos fluorados, usados como catalizadores o fundentes, o bien encontrándose presentes como impureza en los materiales procesados.

El fluoruro que más se emite es el ácido fluorhídrico. Cuando los materiales que contienen fluoruro de calcio o fluorapatita de calcio se calcinan o se tratan con ácido en presencia de arena, se hidrolizan rápidamente para producir ácido fluorhídrico. El agua tiene una gran afinidad por el ácido fluorhídrico y la absorción del gas con agua se usa como método de control. Sin embargo, si el fluor elemental se encuentra presente en los gases, el agua pura podría ocasionar peligros de explosión.

Las eficiencias de colección que se obtienen al usar lavadores húmedos son del 95 al 99.9%. Las mayores eficiencias se obtienen al utilizar lavadoras de dos o tres etapas.

Los tipos más usados de lavadores son de spray, venturi, ciclón húmedo, impacto y lechos empacados. El principal problema con cierto tipo de equipos es la precipitación de fluoruro de sílice o de calcio.

En algunos procesos el licor que sale del lavador se trata con caliza para eliminar el ion fluor como fluoruro de calcio insoluble.

Uno de los problemas más difíciles es la reducción de las emisiones de los vertedores del triple perfosfato.

En estos sistemas se ha logrado una eficiencia del 99%. La instalación consiste de cuatro lavadores ciclónicos en paralelo, que manejan un flujo total de aire de 350,000 pies cúbicos por minuto. El agua de cal que se utiliza para el lavado es a 3000 galones por minuto. El costo de este sistema es de aproximadamente de \$12,000,000.00.

Debido a los grandes volúmenes que se manejan del gas tratado es muy importante la caída de presión a través del sistema de lavado.

Las corrientes de gas que contengan fluor elemental y fluor en estado gaseoso, no deberán lavarse con agua pura, debido a que pueden llegar a ocurrir explosiones bajo algunas circunstancias. Por lo tanto, en estos casos se recomienda el uso de procesos más caros, tales como el proceso de hidróxido de sodio. En este proceso el fluor y el ácido fluorhídrico se absorben continuamente en una solución de hidróxido de sodio del 5 al 10%. El efluente líquido se trata con una pasta caliza. El precipitado de fluoruro de calcio se elimina continuamente de un tanque de asentamiento.

Cloro.— En la producción de cloro, se debe ventear una mezcla de gases inertes y cloro. La principal fuente de estos gases son los respiraderos de la principal unidad de licuefacción y los respiraderos de los tanques de aire que se utilizan para transferir el cloro. Ocurren pérdidas similares en muchas operaciones de consumo de cloro. Por ejemplo, muchas cloraciones requieren cloro en exceso para ser completas y ese exceso debe ser venteadado.

Quienes producen y consumen cloro utilizan varios métodos para recuperar o disponer de la mezcla de gases inertes y cloro. Un método consiste en reducir la concentración de cloro en la mezcla, pero lo que se usa con más frecuencia es condensarlo a presiones elevadas o a bajas temperaturas o combinando ambas. Esto condensa el cloro adicional y los gases restantes se ventean en grandes chimeneas para dispersarse en concentraciones aceptables.

El cloro residual se puede absorber con agua fría en una torre empacada. Sin embargo, el disponer del agua saturada de cloro representa otro problema, por lo que no es muy recomendable este método.

Otro proceso hace reaccionar el cloro con una solución de hidróxido de sodio o de sal. La reacción será más completa si se usa un exceso de solución cáustica. Pero de nuevo el disponer de la solución de hipoclorito que resulta es un problema, a menos que alguna planta cercana la utilice.

Un método poco usado consiste en la reacción con cloruro ferroso para formar cloruro férrico el cual reacciona posteriormente con trazas de metal para formar de nuevo cloruro ferroso. Este proceso resulta económico si se aprovecha el cloruro ferroso o férrico resultante. Se ha utilizado azufre de una manera similar para formar cloruro de azufre. Al igual que el método anterior, sólo resulta costeable si tiene utilidad el cloruro de azufre.

Materia particulada.— La materia particulada comprende tanto sólidos como líquidos, como son los polvos, el humo, humos condensados y nieblas. La industria química emite una variedad infinita de materia particulada, la cual puede provenir de una reacción química o de procesos como secado, calcinación, cribado, molienada, transporte, mezclado o empaque.

Los mecanismos de control más utilizados en este caso son: colectores ciclónicos, colectores de bolsas, una gran variedad de lavadores, precipitadores electrostáticos, eliminadores de niebla, aglomerantes, chimeneas y filtros de fibra. Por lo general al menos dos de estos tipos de control son los adecuados para un proceso dado y para determinar el sistema óptimo es necesario hacer una evaluación.

La primera consideración es el grado de abatimiento que se requiere para controlar el problema. Por lo que es necesario determinar la clase de corriente gaseosa y el tipo de materia particulada.

Las principales propiedades de la corriente del gas son su temperatura, densidad, punto de rocío y volumen. La temperatura, por ejemplo, puede ser demasiado elevada para ciertos tipos de equipo, y será necesario un enfriamiento. Los quemadores de desperdicios serán económicos si la temperatura del gas es superior a los 1200 °F. Otros métodos de enfriamiento son las columnas de radiación, enfriadores con evaporación, y la dilución con el aire ambiente.

Es necesario determinar el punto de rocío del gas para evitar que ocurra alguna condensación dentro del sistema. El punto de rocío del agua ocurre a los 190 °F; en el trióxido de azufre cuando está en exceso ocurre a los 300°F.

Otra consideración importante es el volumen del gas ya que éste puede permanecer constante o variar ampliamente. Por lo que el sistema debe ser analizado bajo las peores condiciones, esto es, al mayor volumen del gas.

Varias propiedades de la materia particulada que deberán determinarse son la distribución de tamaño de la partícula, la concentración de la partícula, su densidad, corrosividad, obrasividad, sin embargo el material tiene propiedades nexas como son el ángulo de reposo del material si éste es un polvo que se colectará en seco, aunque el material sea viscoso o hidróscopico.

Los problemas de corrosión deberán considerarse siempre y cuando la materia particulada sea inerte. Por ejemplo, las trazas de halógenos, tales como cloruros y fluoruros, harán más corta la vida de los lechos o bolsas de fibra de vidrio. Problemas semejantes ocurren con la condensación del trióxido de azufre.

Al usar como parámetros de diseño estas propiedades los sistemas de control alternados podrán evaluarse. Un buen diseño del sistema de control deberá cumplir con los requerimientos clave; el tamaño del equipo deberá ser apropiado para el volumen de gas; deberá ocupar el espacio disponible y construido con los materiales adecuados; deberá ser compatible con el proceso básico; y deberá dis-

poner de la instrumentación necesaria para asegurar una fácil operación y una larga vida.

Si se tienen estos criterios junto con una evaluación económica de los costos tanto capital como de operación de los sistemas alternativos estudiados, se podrá indicar el tipo de mecanismo de control más adecuado para un proceso particular.

En algunas ocasiones es de gran ventaja el considerar dos tipos diferentes de colectores en serie, por ejemplo, un ciclón para coleccionar material valioso de cuarzo, seguido de un lavador de gran eficiencia, un comportamiento de bolsas o un precipitador electrostático para coleccionar el material fino que descarga el ciclón. En la industria del carbón los precipitadores electrostáticos se usan para aglomerar las partículas finas, que posteriormente se coleccionan en un compartimiento de bolsas. Puede ser de gran utilidad el coleccionar los polvos de cuarzo en un ciclón y descargar el efluente que contiene humos y/o dióxido de azufre a través de una chimenea lo suficientemente alta para una difusión atmosférica.

[Compuestos orgánicos.—

Los compuestos orgánicos son por lo general combustibles, algunas veces tóxicos en varios grados y a menudo olorosos y cierto tipo de compuestos orgánicos reaccionarán con óxido de nitrógeno en la atmósfera para producir smog,

Sólidos y Breas.—

Algunas reacciones en varios procesos de química orgánica producen desechos sólidos y breas viscosas y pesadas. Tales materiales, generalmente se incineran y por lo tanto tienen un potencial de contaminación atmosférica.

Para sete tipo de desechos se dispone de una gran variedad de incineradores. El combustible auxiliar se usa para principiar la combustión, la cual se mantiene constante una vez que se alcanza la temperatura de combustión. La mayoría de desechos se eliminan con una temperatura de 1600 °F o mayor en los gases de salida.

Los desechos pesados pueden mezclarse con otros residuos para ajustar la viscosidad antes de ser quemados o disueltos. Los sólidos no solubles, se les reduce de tamaño en un molino de marti-

llos o con algún otro mecanismo para mezclarse posteriormente con otros residuos líquidos para formar una pasta y ser alimentados al incinerador.

Ultimamente se ha demostrado una gran eficiencia de un incinerador abierto en su parte superior para varios desechos químicos sólidos, tales como la nitrocelulosa, fibras sintéticas, residuos plásticos y varios polímetros. Este consiste en un recipiente rectangular que puede ser una cavidad en la tierra o bien un recipiente. La principal característica de esta unidad es la admisión del aire para la combustión a través de un orificio en el recipiente cerrado. Este sistema es muy simple con una gran capacidad relativa.

Líquidos.—

Los líquidos orgánicos volátiles pueden estarse liberando a la atmósfera, debido a las pérdidas de éstos, por los respiraderos de los tanques de almacenaje, por las válvulas de escape, por el empaque de la bomba y por las conexiones de la tubería.

Se utilizan varias técnicas para minimizar las pérdidas por evaporación se reduce considerablemente al utilizar tanques con techos flotantes y sistemas de recompresión del vapor en los tanques cerrados con agitación. Las emisiones al cargar los carros tanque se pueden reducir por técnicas de llenado por inmersión.

Dependiendo de la naturaleza de proceso y del compuesto orgánico, los vapores podrán liberarse a través de las válvulas de escape y ventearse a la atmósfera por dispersión o bien quemarse.

Las pérdidas en las bombas se evitan usando agentes selladores.

Los desperdicios orgánicos refractarios que son tóxicos o no biodegradables frecuentemente se queman, para preveer posibles problemas de contaminación al agua. Se usan cámaras de combustión tanto horizontales como verticales, y las corrientes acuosas u orgánicas se pueden quemar simultáneamente a través de quemadores separados. Se recomienda una atomización mecánica de aire o vapor, dependiendo de la naturaleza del desecho y de los costos de utilización.

El rango de temperatura de salida es de 1000 a 2000 °F dependiendo del tipo de combustible. Si el desecho es totalmente orgáni-

co éste se quemará por completo hasta reducirse a bióxido de carbono y agua sin el uso de un combustible auxiliar. Algunas veces se acostumbra utilizar el calor con este tipo de incineración debido a que en la mayoría de los casos el desecho líquido es un combustible aceptable.

Parte de los desechos combustibles son por lo general soluciones acuosas con compuestos orgánicos miscibles. También pueden contener materia inorgánica no combustible, por lo que resulta conveniente utilizar un combustible auxiliar para el quemado de estas soluciones acuosas. En muchos casos un desecho acuoso parcialmente combustible se puede concentrar por medio de una evaporación a priori a la combustión. Tal concentración debe ser la necesaria para que el desecho sea quemado directamente con el cual se reduce el tamaño y el costo del equipo de incineración en la mayoría de los casos.

Los desechos líquidos que contienen sales de sodio presentan varios problemas. La combustión completa da como resultado la emisión de un humo muy fino de carbonato de sodio. Dependiendo de la concentración de las sales de sodio, será necesario el dispersar la pluma en una chimenea o bien la instalación de un equipo de control adicional que consiste generalmente de un lavador.

Hay que tomar en cuenta el forro del incinerador cuando se queman sales de sodio. Los ladrillos de alúmina se deterioran rápidamente debido al ataque del sodio. Se recomiendan para estos casos ladrillos refractarios de cromo debido a que se superior su resistencia. La alta conductividad térmica del ladrillo de cromo requiere el uso de un forro de ladrillo de baja conductividad para prevenir temperaturas excesivas del metal del incinerador.

El costo de un incinerador que maneja una corriente de desechos compuesta de 1800 lb/hr de una mezcla orgánica disuelta en 6000 lb/hr de agua es de \$875,000.00. Se utiliza un combustible auxiliar de gas natural de 3000 pies³/hr para mantener una temperatura del gas a la salida de 1600 °F.

La incineración de desechos halogenados, también requiere de consideraciones especiales. Por lo común, el halógeno es el cloro

y en algunas ocasiones el fluor. Debido a que tanto el cloro como el fluor son altamente tóxicos y poco solubles en agua, los productos de la combustión de los halogenados orgánicos se hacen reaccionar con hidrógeno para formar ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico, los cuales pueden eliminarse de la corriente gaseosa por medio de un lavado con agua o un cáustico. El hidrógeno se alimenta en exceso por inyección al combustible auxiliar dentro de la cámara de combustión. Se puede usar entonces una torre de lavado convencional para eliminar el ácido clorhídrico o el ácido sulfhídrico.

Un sistema incinerador-lavador para disponer de los desperdicios clorados pesados es lo más usado. Una vez que la unidad alcanza una temperatura de operación de 1300 °C ya no se necesita el combustible auxiliar. Los gases de salida se enfrían y se lavan y el efluente líquido del lavador se neutraliza. El costo de este equipo es de aproximadamente de \$3,125,000.00 por unidad que destruya un promedio de 3000 lb/hr de residuos.

Gases y vapores.—

Una amplia variedad de gases y vapores se liberan en la producción y en el uso de compuestos orgánicos. Le disponen de un gran número de técnicas de control que son específicas para los distintos procesos. Estas técnicas de control son: dispersión, por medio de chimeneas, combustión directa y catalítica, absorción, adsorción, compresión y refrigeración. Las técnicas más apropiadas dependerán de la naturaleza física y química del vapor, su concentración, su volumen a la salida, su flameabilidad, sus características explosivas, su toxicidad y su valor económico como materia prima o como producto.

A menudo, las altas chimeneas son convenientes para diluir fuentes de bajas concentraciones.

La incineración se puede llevar a cabo a flama directa o bien por una oxidación catalítica. Se ha aplicado para la oxidación de los vapores de desechos orgánicos a dióxido de carbono y vapor de agua. El incinerador a flama directa tiene unos costos bajos de capital, pero los costos de operación son altos (debido al combustible auxiliar), mientras que una unidad catalítica tiene elevados costos de capital pero bajos requisitos de combustible. Cualquiera de los dos

dará como resultado un efluente claro y menos oloroso, si la temperatura del gas a la salida es lo suficientemente alta.

Las unidades catalíticas no se adaptan a corrientes de gas que contengan cantidades apreciables de metales pesados, líquidos o sólidos. Los hidrocarburos clorinados, el arsénico, el plomo y el zinc son venenos para la mayoría de los catalizadores.

La absorción de los gases y vapores orgánicos se lleva a cabo en una gran variedad de medios líquidos.

La adsorción de vapores orgánicos en sólidos porosos tales como el carbón activado, el alúmina activada y la del de sílice, se utiliza cuando el vapor se puede recuperar económicamente para posteriormente ser regenerado y poderse utilizar.

* Olores.—

El equipo y las técnicas que se usan para reducir las emisiones de gases y vapores, también se aplican para la eliminación de olores. Sin embargo, la concentración de un compuesto oloroso puede ser menor a las de las emisiones de gases y vapores, por lo que es necesario modificar dichas técnicas.

A la fecha, no se ha perfeccionado ningún instrumento que detecte mejor los olores que la nariz humana.

Los olores se pueden eliminar por medio de una oxidación ya sea química o bien una combustión. En algunas circunstancias los incineradores de vapor son los mecanismos más prácticos para eliminar los problemas de olor.

El tipo de equipo puede dividirse en dos categorías, una incineración a flama directa y una incineración catalítica. Los quemadores a flama directa consisten esencialmente de un sistema alimentador de combustible que también se adaptan. Los factores críticos de diseño son, el contacto de la flama y su temperatura, su turbulencia y su tiempo de residencia. Cuando entra un gran volumen de aire para disolución o enfriamiento después de la sección de quemado es necesario que el tiempo de residencia sea el adecuado. De otra manera la combustión puede resultar incompleta.

Con cualquier tipo de combustión que ésta sea lo más completa posible; de otra manera los compuestos sólo se oxidan parcialmente (aldehídos) y se pueden liberar ácidos orgánicos que resultan más nocivos que el compuesto original.

Un caso especial del quemador de flama directa, es cuando la corriente de los gases de salida se alimentan directamente a un compartimiento en el que se genera vapor. En este caso la flama es a la vez una fuente de calor y quemador de humos. Esto es conveniente cuando el volúmen de gas combustible es más elevado que el de la corriente de gas contaminado.

En el incinerador catalítico es más bajo el combustible que se utiliza. El tipo de catalizador que se utiliza para la adsorción opera en un rango de 600 a 900 °F y tanto vapores como gases se pueden quemar a esta temperatura sin la necesidad de una flama. Las unidades catalíticas se aplican para contaminantes gaseosos y para aquellos que se vaporizan a la temperatura de operación de la superficie del catalizador. Esto no es útil para aquellas corrientes gaseosas que contienen cantidades apreciables de metales pesados. Los hidrocarburos clorinados, el arsénio, el plomo y el zinc son venenos para la mayoría de los catalizadores.

Resumiendo, los incineradores de vapor pueden realizar un trabajo efectivo para evadir los problemas de olor para de la mayoría de vapores orgánicos. Los costos de operación respecto al combustible son elevados.

Los olores se pueden oxidar químicamente. El ozono puede eliminar ciertos problemas de olor. Otros agentes oxidantes, tales como el permanganato de potasio, el cloro y el dióxido de cloro se añaden a las aguas que circulan a través de un lavador de gases, para eliminar una gran variedad de olores. La reacción de oxidación destruye el olor o lo modifica a algún otro más agradable.

El carbón activado es el más efectivo para deodorizar los efluentes gaseosos. Sin embargo, el carbón no puede absorber adecuadamente gases mal olientes con temperaturas mayores de 120 °F, y la corriente deberá estar relativamente libre de partículas.

Cuando nunca se ha usado carbón activado para controlar los olores, se debe tener cuidado que el carbón sea regenerado para evitar que se sature y sea inefectivo. El material oloroso que se desplaza o regenera deberá incinerarse o controlarse por otro método para evitar que se descargue a la atmósfera.

La chimenea para dispersión atmosférica es útil para eliminar olores de baja concentración como un mecanismo secundario.

CAPÍTULO VII

EQUIPOS DE CONTROL PARA LA CONTAMINACION ATMOSFERICA

La naturaleza de la Contaminación Atmosférica.—

La contaminación atmosférica está constituida de partículas o impurezas que se encuentran suspendidas o transportadas en una corriente de gas o aire en movimiento. Este material contaminante puede estar en forma líquida (como niebla), como fumarola gaseosa o como partícula sólida, incluyendo los polvos. Por lo general, produce al menos uno de estos cuatro efectos detrimentes: pérdida de productos valiosos, una atmósfera molesta, daños a la calidad del producto manufacturado y mantenimiento del equipo.

Las partículas se clasifican en dos categorías en cuanto a tamaño; submicro o micro. El diseño del equipo y la eficiencia de colección están directamente relacionados con el tamaño de la partícula. Las partículas de una micra o de mayor tamaño son por lo común, fáciles de colectar, mientras que en las de menor tamaño (submicras) es más difícil su colección. Sin embargo las partículas muy pequeñas (0.005 micras) se eliminan muy fácilmente en una torre empacada.

La primera consideración en la selección apropiada del colector es la naturaleza de los materiales contaminantes a ser colectados. Origen de los Contaminantes Atmosféricos.—

Para escogerse el colector apropiado se deberán conocer las características físicas y químicas de todas las partículas. El origen de la partícula nos da un indicio de si el contaminante es una fumarola, un polvo, una niebla o simplemente un gas indeseable.

Las partículas que se formaron debido a una desintegración mecánica por lo general tienen un tamaño en micras. Estas pudieron haberse formado debido a una pulverización, a una trituración o a una molienda. Por lo general esas partículas son mayores de 1 ó 2 micras, habiendo excepciones.

Las partículas creadas por una desintegración común como el aserrar pueden tener un tamaño aproximado de 15 micras.

Las partículas debidas a un cambio de estado físico o a un calentamiento intensivo y operación de fundido tienen un tamaño sub-micrónico.

Las operaciones de fundición de las industrias acereras y no ferrosas producen gases de combustión que contienen fumarolas metalúrgicas del rango de las submicras. Lo fino de las fumarolas está directamente relacionado con la intensidad del calor.

Las principales áreas donde se producen estas fumarolas metalúrgicas son:

- 1.— Inyección de oxígeno - para elevar la temperatura de fundido a una velocidad dada.
- 2.— Horno eléctrico - para lograr temperaturas superiores a 2000 °F.

Los contaminantes que constan de una combinación de partículas se encuentran en el aire que ha sido procesado dentro de una planta.

Una condición secundaria al coleccionar un colector es la posibilidad del colector de satisfacer las necesidades que se requieran.

Información Primaria para diseñar el equipo.—

Dado que cada problema de contaminación atmosférica es único, se requiere de un conocimiento preliminar de los contaminantes para diseñar el equipo apropiado. Los factores que influyen en la selección y diseño del equipo son el tamaño de la partícula, la temperatura del gas, y los constituyentes corrosivos. Para adquirir estos conocimientos, deberán colectarse primeramente muestras de polvos y de nieblas.

La niebla del ácido sulfúrico (SO_3) nos ilustra cómo las propiedades químicas de un contaminante pueden ocasionar complicaciones. Aparece como un humo visible con poco olor, el SO_3 es una niebla aerosol submicrón que forma ácido sulfúrico al combinarse con la humedad. Para ser lavado SO_3 debe hidratarse primero para convertirlo en ácido sulfúrico para poderlo remover.

Las plantas metalúrgicas colectan el ácido sulfúrico, por lo general, con un precipitador electrostático. Más recientemente, las plantas que producen ácido sulfúrico han utilizado lavadores tipo venturi (operando con una caída de presión de 30 pulgadas W.G.)

para desaparecer la niebla de SO_3 . Un problema similar de colección ocurre con los humos del pentóxido de fósforo P_2O_5 .

Como regla, una niebla submicrométrica debe reducirse hasta 1 o $1\frac{1}{2}$ mg/scf para lograr que sea invisible.

Análisis de los Constituyentes de las Corrientes Atmosféricas Contaminadas.

Distribución del tamaño de partícula. La distribución de las partículas se miden por lo común en la concentración total en masa llevada por aire en granos por pie cúbico estandar a 60°F .

Técnicas para analizar el tamaño de partícula. La Técnica más aceptada es la microscopía fotoelectrónica y es un método de tiempo consumido para medir el tamaño de partícula; requiere un ojo interpretativo experimentado para determinar si las partículas son discretas (separadas) o aglomeradas. Después de tomar una muestra de gas para ser dispersado en la cámara de reflexión del microscopio, es imposible conocer si fue dispersado de la misma manera como originalmente viajaba en la corriente de aire, por lo que el verdadero tamaño de la partícula en vuelo es difícil de precisarlo. Este método es inadecuado para partículas más pequeñas de las que principalmente se encuentran en los problemas de contaminación.

Análisis de polvos, humos y materia particulada. El método de thimble utiliza una caja equipada con discos o cilindros hechos de papel Whattman o Alundum (óxido de aluminio). El alundum tiene la ventaja de resistir temperaturas superiores a $1,000^\circ\text{F}$. Sin embargo el thimble estandar es ideal para coleccionar muestras de 1 a 20 mos, para muestras más pequeñas es necesario usar el disco en un anillo soporte. El uso de este aparato a bajas temperaturas puede ocasionar que condense la humedad, un mal funcionamiento y una separación, eventual del disco. Para prevenir esto, cuando las temperaturas son bajas y pudiera haber condensación, se utiliza por lo general un elemento de calentamiento para mantener la temperatura por encima de su punto de rocío. Después de todo esto el gas entra a un condensador o a un baño de hielo que atrapa el vapor de agua, procediendo entonces a tomar lecturas de presión - temperatura. Pa-

ra que los gases sigan estos movimientos se utiliza una bomba de vacío o bien un eyector. Este equipo es para coleccionar material polvoso seco.

Un impactador Smith - Greenberg se puede instalar de una manera similar al thimble en caso de estar presentes contaminantes tales como SO_2 como la condensación ocasiona un incremento del volumen de líquido en el impactador, esta cantidad se mide, se calcula el volumen y se suma al volumen del aire medido. Este volumen correcto se utiliza para calcular los gramos por pie cúbico de contaminantes.

Determinación de los contaminantes gaseosos. Es relativamente simple coleccionar aquellos constituyentes que estrictamente son gases, tales como, SO_2 , HF , NH_3 , CO_2 , H_2S , etc. Dos o tres impactadores Smith - Greenberg en serie dan un buen resultado con NaOH o H_2SO_4 diluido y ayudan para coleccionar constituyentes básicos o ácidos.

Determinación del volumen del gas. La determinación del volumen del gas requiere de dos precauciones.

- 1.— Determinar la velocidad del gas en un punto del ducto donde el gas se mueva uniformemente siguiendo una línea recta. Cualquier interferencia en el flujo de gas ocasiona que el resultado sea erróneo. El flujo de gas uniforme se indica por lo general como 5 a 10 diámetros corriente arriba desde un codo en el ducto del gas.
- 2.— Escoger un lugar conveniente para colocar el probador, con lo cual se asegura una técnica y manejo de equipo exactos.

El análisis con tubo pitot con un manómetro inclinado es relativamente simple. Los datos deben tomarse en el ducto usando un arreglo de sección transversal, igualando las lecturas de un número de áreas equivalentes; el centro de cada área es el punto de medición con el tubo pitot.

Determinación de la densidad del gas. Es necesario establecer si hay humedad en el gas o si el peso molecular del gas es diferente al del aire estandar. La variación en la densidad medida se puede deber

a grandes cantidades de CO_2 y SO_2 presentes.

Determinación de nieblas, polvos (incluyendo humos) y constituyentes gaseosos. Cada una de estas tres categorías requieren de aparatos especiales.

Para muestrear nieblas aerosoles, tales como SO_3 , P_2O_5 y monoetanolamina (MEA), se cubren los filtros (tres en serie) con 1 pulgada de fibra de vidrio. El gas debe tener una caída de presión de mercurio aproximadamente a través de los filtros para que resulte una buena colección. Cuando hay presencia de vapor de agua, los filtros se montan dentro de una caja de madera que contiene focos con el objeto de evitar la condensación del agua. Después de esto el gas sigue al impactador de Smith-Greenberg para remover los constituyentes gaseosos tales como el SO_2 . Los impactadores

pueden contener 100 cm³ de NaOH, 0.5 N. En la titulación se usa entonces, para determinar el SO_3 lavado de la fibra de vidrio como H_2SO_4 . Los gases que se mueven debido a una bomba de vacío o por un eyector, se miden entonces tomando la temperatura y la presión. Propósito del equipo de Control.—

En muchos casos la recuperación es deseable económicamente, como sucede en la cual se utiliza el amoníaco recuperado. En la industria del acero, se produce óxido de hierro en el alto horno, que se colecta y regresa a las plantas de sinterizado para ser reutilizado mientras que el gas limpio que contiene CO se regresa también para ser estimado.

Factores en la recuperación de partículas. Primeramente hay que determinar si pueden regresarse las partículas al proceso en forma seca o bien húmeda. Con un alto contenido de humedad, el material al filtrarse y secarse, con lo que las partículas finas pueden estar continuamente reentrando.

Si los contaminantes no se pueden regresar al proceso, habrá que determinar si tienen algún valor comercial.

Existen tres métodos básicos de recuperación; lavadores húmedos, colectores de tela y precipitadores electrostáticos. En base al reuso del material recuperado, será el método de colección. }

Filtros.—

El método más conocido para eliminar polvos de una corriente de aire es por medio de filtros. Es bastante versátil y de gran eficiencia para colectar partículas sólidas de un rango bastante amplio de tamaño.

Como regla general, la eficiencia aumenta en proporción directa a la cantidad de área filtrante. Un área filtrante maximizada permite una baja caída de presión, una gran capacidad en reserva para expandirse y una mayor vida media (de la tela). Por lo cual, un diseño eficiente del colector de polvos implica el tamaño ideal de las bolsas de tela y un costo razonable. Para maximizar la superficie filtrante por unidad de volumen, frecuentemente se determina el tamaño seleccionado, la relación más alta del filtro (velocidad a través de la media, expresada en pies por minuto) consistente con una buena operación.

Filtros de tela. La tela actual del filtro se escoge en base a su capacidad para resistir temperaturas y tensiones inherentes en el proceso, igual que su compatibilidad con los contaminantes a colectar. Las telas son materiales fibrosos, ya sea naturales o sintéticas, tejidos o afelpados. En caso de telas tejidas, el material sirve como base para que se acumulen los polvos, llamándose a esta acumulación, torta.

Factores que afectan al filtro de tela. Los principales factores que afectan el filtro son: La distribución de tamaño y fuerza de las partículas, la configuración de la partícula, la tendencia a aglomerarse, la carga estática, propiedades físicas, como la adhesión o la sublimación y las propiedades químicas como la cristalización y la polimerización. Los factores que afectan al sistema son: los constituyentes gaseosos, la carga, las limitaciones medias, la temperatura, la humedad, la presión diferencial deseada, la turbulencia y el origen de los polvos.

Los factores de aplicación especial se pueden dividir en tres categorías, básicamente, el primero de ellos lo constituyen los respiraderos molestos, en los transportadores y las estaciones de empaque. El segundo será la colección producida en molinos, secadores y clasificadores. El tercero será el proceso del filtrado del gas en secadores, hornos y reactores.

Equipo.— El equipo básico en el compartimiento de bolsas filtrantes tubulares soportadas por el gas que entra por el extremo. El polvo soportado por el gas se mueve ya sea por succión (presión negativa) o por propulsión (presión positiva) a través del filtro, donde las partículas de polvo quedan atrapadas, pasando solamente el gas limpio.

Los filtros se encuentran soportados dentro de un compartimiento (el gas se mueve por succión). El compartimiento consta de una entrada para el gas con polvo, una salida del gas limpio y un espacio de descarga de las partículas colectadas.

Los sistemas de filtros de tela constan de unidades preensambladas o en módulos. En cualquier forma, los filtros de tela son extremadamente flexibles y pueden acomodarse de acuerdo a diversas variaciones de capacidad.

Los materiales de construcción son de acuerdo al tipo de filtro, las condiciones climáticas y al grado de estandarización en la planta. Las corazas pueden ser desde acero planta acerada hasta asbesto corrugado. El aislante depende de las condiciones climatológicas. Por ejemplo, las bolsas se endurecen y se rompen fácilmente si se dejar enfriar los gases hasta su punto de condensación. Por otra parte, los colectores de vidrio deberán diseñarse considerando las altas temperaturas a que estarán sujetos. Los polvos se manejan posteriormente, mediante transporadores de tornillo o neumáticos.

La corriente del horno no se afecta por el compartimiento de bolsas, sin embargo si existe una caída de presión excesiva a través de las bolsas, disminuirá proporcionalmente la comprensión del aire.

El gas limpio se puede sacar del colector por una chimenea o bien por mamparas que se abren y cierran debido a un control de temperatura.

Bolsas de fibra de vidrio. Además de las ventajas conocidas de estos filtros, tales como, su resistencia química y su gran resistencia a la tensión, se le adicionan silicones que rodean a las fibras individuales a muy altas temperaturas. Con esto se lubrican y se previene a las fibras de su auto abrasión al flexionarse, ayudándolo también a la descarga de los polvos.

Se usan dos sistemas por lo común, sistemas de colectores por succión, que utilizan un ventilador del lado de salida del gas limpio, son completamente cerrados y tienen varios compartimientos, con controles de temperaturas con lo cual eliminará los colectores mecánicos. Los sistemas a presión tienen un ventilador del lado de gas sucio, lo cual permite que sea un compartimiento abierto y no tiene divisiones dentro del área de las bolsas.

El diseño más común de filtros de bolsa de vidrio es el que se utiliza en la industria del cemento.

Cuando el polvo que se acumula en la superficie del filtro llega a ser excesivo, deberá limpiarse la unidad, por cualquiera de los cuatro métodos, que son: flujo reversivo (retrolavado); agitación, golpeo o vibración del elemento filtrante; colapso parcial o total de los elementos; y por métodos combinados.

Limitaciones de los filtros.— Los filtros de tela necesitan un mantenimiento y reparación periódicos. Cuando para esto se requiere que se pare la planta, resulta bastante costoso. Las bolsas necesitan de una constante protección al endurecimiento y a la rotura cansados por la condensación. Por lo contrario si la temperatura es excesiva será necesario un enfriamiento primario. La poca duración de la bolsa se ve afectada por la agitación o la atención inadecuada en el método del colapso durante el limpiado.

COLECTORES MECANICOS.—

Ciclones.—

Uno de los tipos más viejos para la colección de polvos que se usan en la industria es el ciclón. Hoy en día se usan más los ciclones en aplicaciones comerciales que cualquier otro tipo de colector.

Variaciones de diseño.— Básicamente existen dos tipos de colectores mecánicos para aplicaciones comerciales los ciclones tangenciales y los ciclones axiales.

A los ciclones axiales, frecuentemente se les conoce como multiciclones. Por lo general son de diámetro pequeño (de 3 a 24 pulgadas), se encuentran agrupados juntos dentro de un compartimiento, con una entrada común y serie de tubos de salida, por los cuales

se descarga el gas limpio. Debido a su pequeño diámetro, tienen mayores eficiencias que los ciclones tangenciales de mayor diámetro. Sin embargo, debido a su tamaño, las entradas axiales son pequeñas y están propensas a taponarse. Esto resulta cierto cuando la carga de polvos está húmeda y en gran proporción. Para operaciones a gran escala se diseñan ciclones de multitubos, los cuales pueden manejar grandes volúmenes de gas al 50% del costo de un ciclón tangencial de mayor diámetro.

En principio, ambos tipos de colectores funcionan, ya sea que la carga de polvos cubre tangencialmente por un tubo o esté impulsado por aspas, que originan un giro en una aspiral descendente.

Principio general. En ambos tipos de colectores, el gas cargado de polvos origina un giro formando una aspiral descendente. La acción de giro ocasiona que las partículas suspendidas se vayan hacia la parte baja del ciclón. La componente vertical de la fuerza del giro descendente ocasiona que la partícula se vaya hacia la parte baja de la sección cónica y caiga dentro del compartimiento. Como los gases se mueven hacia abajo, se lleva a cabo el fenómeno ciclónico, creándose un vórtice ascendente causado por el gas, terminando en la cima del cono. Debido a las fuerzas centrífuga e inercial el gas sale libre de partículas.

Fuerzas que afectan a las partículas. Omitiendo las fuerzas gravitacionales, cada partícula de polvo está sujeta a tres fuerzas diferentes.

- 1.— Inercial.— Es la tendencia a moverse en línea recta y es una función de la masa y velocidad de la partícula.
- 2.— Centrífuga.— Esta fuerza se crea como un resultado de la configuración del ciclón. Es una función de la velocidad de la partícula, de el radio de curvatura dentro del ciclón y de la masa.
- 3.— Impedimento por viscosidad.— Esta fuerza se origina como un resultado de la resistencia al flujo dentro de un tamaño y configuración de la partícula y de la viscosidad del gas.

La diferencia esencial entre un ciclón ordinario y uno de alta eficiencia, es su capacidad para originar dentro del ciclón y por su

propio diseño, la fuerza centrífuga suficiente para afectar la concentración de las partículas sin ninguna corriente cualquiera que reduzca su eficiencia.

Operación del ciclón. Básicamente, son cuatro pasos los que se requieren para una buena separación.

- 1.— Concentración del polvo. En un ciclón bien diseñado, la mayor parte del polvo colectable deberá concentrarse en las paredes internas del ciclón al momento en que las partículas viajen a menos de una revolución.
- 2.— Transporte del polvo. Al entrar los gases al ciclón se ocasiona un giro en espiral hacia abajo, al transcurrir una revolución esto se lleva a cabo. El polvo concentrado deberá transportarse hacia la salida del cono y caer en un recipiente. Como el gas se forza hacia abajo, se lleva a cabo una migración del gas hacia el centro del ciclón. Esta migración del gas forma lo que se llama el vórtice ascendente de gas limpio. El flujo de gas ascendente se ve reducido con la migración hacia el centro del ciclón, originándose un incremento en la velocidad de giro a medida que se mantiene la concentración de la partícula a lo largo del ciclón.
- 3.— Descarga de la partícula.— A la salida del cono el polvo fue transportado por fuerzas rotacionales y hacia abajo. Esto originará la descarga hacia abajo y lejos del vórtice ascendente hacia la sección de lavado.
- 4.— Vórtice ascendente.— En el vórtice ascendente está el gas libre de partículas, la cual emigra radial e interiormente a través de todo lo largo del vórtice ascendente.

El colector ciclón está compuesto de varias partes estacionarias, o componentes, cada una de las cuales contribuye al buen funcionamiento del ciclón. La relación entre uno y otro componente determina en última instancia la eficiencia de separación. Por lo que, el determinar las relaciones correctas entre los componentes es un conocimiento exacto basado en una observación empírica y trabajo de laboratorio.

Un ciclón de alta eficiencia puede diseñarse aprovechando las eficiencias de un lavador de alta energía. Sin embargo, sus partes

que la componen pueden estar en tal manera que la caída de presión sea muy alta, lo que es económicamente indeseable. La solución alternativa sería que estuvieran proporcionando el tamaño de partícula, la caída de presión y la eficiencia, para diseñar un colector de un costo aceptable.

En el diseño de un ciclón, el cambiar las proporciones de cualquiera de sus componentes afectaría las características del colector de la manera siguiente: Si se aumenta el diámetro, la eficiencia y la caída de presión se reducen y el costo por cfm aumenta. Si se aumenta la longitud del cono, aumentan la eficiencia, la caída de presión y el costo por cfm. Si se aumenta el arco de entrada, disminuyen la eficiencia, la caída de presión y el costo por cfm. Si se reduce la longitud del cono es poco el efecto en la eficiencia, en la caída de presión y en el costo por cfm.

Factores operacionales.—

Debido a que no existen partes movibles en un colector ciclón el mantenimiento es mínimo. Sin embargo, los colectores mecánicos son susceptibles a la erosión y a la corrosión. No obstante, esto puede minimizarse al considerar la velocidad del gas a la entrada del ciclón (que no exceda de 3600 pies/minuto) y los materiales de construcción.

Los límites de temperatura del ciclón están dados por los materiales de que está construido el ciclón. En muchos casos los ciclones están forrados con ladrillos refractarios para protegerles de la temperatura.

Por lo general, si la carga de polvo es grande, se incrementa la eficiencia del ciclón. Es común expresar la eficiencia de los colectores mecánicos en forma gráfica, graficando el porciento de colección contra el tamaño de partícula.

En esencia, la eficiencia de un colector mecánico depende del tamaño de partícula de polvo que se va a coleccionar. Esas eficiencias pueden variar del 65 al 99.9 por ciento, dependiendo del polvo y de el diseño del ciclón.

Las variaciones del costo de un ciclón se deben a las variaciones en los materiales de construcción o en la eficiencia requerida.

CAMARAS DE SEDIMENTACION.—

Las cámaras de sedimentación son los colectores más sencillos, consisten en un compartimiento cerrado en el que la velocidad del gas transportador se reduce lo suficiente como para que las partículas transportadas al perder velocidad se sedimenten por influjo de la fuerza de gravedad.

La cámara de sedimentación Howard tiene la variación que en su interior se encuentran una serie de placas horizontales, paralelas al flujo del gas, en que se pueden sedimentar las partículas, incrementándose así la eficiencia de colección.

A pesar de que las cámaras de sedimentación son de diseño simple y pueden ser construídas de casi cualquier material, son muy poco usadas por el gran espacio que ocupan y por la baja eficiencia de colección. Aún así, su bajo costo inicial y de operación y la escasa pérdida de presión han hecho que se usen para recuperar partículas mayores de 10 micras, seguidos de un segundo elemento colector de mayor eficiencia en: la refinación de metales, en la industria alimenticia y en algunas calderas.

SEPARADORES INERCIALES.—

Los separadores inerciales operan bajo el principio de que un gas transportador de partículas al ser desviado en torno a un obstáculo, cambiará su trayectoria, pero las partículas, dotadas de una mayor fuerza de inercia tienden a abandonar la nueva trayectoria del gas y a chocar con la superficie interpuesta.

Las variaciones que se han dado aplicando el principio anterior, son tantas que únicamente serán descritas los tipos principales.

El más sencillo es una cámara cerrada provista de pantallas colocadas perpendicularmente a la dirección del flujo del gas transportador, que toma un curso tortuoso. De los cambios súbitos en la dirección del gas resulta que las partículas choquen contra las pantallas de donde se sedimentan por gravedad. El aparato funciona con eficiencia para partículas mayores de 20 micras.

Un segundo tipo es el colector Louver o de persiana que consta de una cámara en la que hay una serie de placas colocadas oblicuamente respecto a la corriente del gas, de manera que se produce una

sola desviación rápida de la dirección del gas y como las partículas no lo pueden seguir, chocan contra el obstáculo rebotando a la cámara de acceso.

Aproximadamente el 90% del gas pasa entre las persianas y el restante 10% y las partículas salen del colector por una salida secundaria. Funciona con eficiencia satisfactoria para partículas de 10 micras como mínimo.

El tercer tipo de colectores inerciales se caracterizan por tener un motor que hace girar a las aspas de un ventilador de diseño especial, tal que ejerce una fuerza dinámica sobre el gas lanzado a las partículas por fuerza centrífuga, a una tolva colectora dando salida al gas semilimpio por otro conducto. Es eficiente también para partículas de un mínimo de 10 micras de diámetro.

En general, se puede decir que los separadores inerciales tienen como ventaja su simplicidad, su bajo costo de construcción, la reducida caída de presión y el amplio rango de temperatura y presiones con los que puede limpiar a un gas. Sin embargo, tiene la desventaja que se tapa por la acumulación de partículas en los desviadores, presenta problemas de desgaste de los mismos por abrasión y no puede operar con partículas fibrosas o pegajosas.

Precipitadores electrostáticos.—

Los precipitadores electrostáticos son los colectores de alta eficiencia más usados en la industria y su funcionamiento se basa en el principio físico de que las cargas del mismo signo se repelen y las de diferente se atraen.

Están compuestos por una fuente de poder que genera una corriente unidireccional de alto voltaje (de 13,000 a 90,000 volts) un sistema de electrodos, una cámara cerrada que es la zona de precipitación y un sistema de colección de partículas.

La fuente de poder genera un campo electrostático entre los electrodos (el de descarga es usualmente el negativo y el de colección, el positivo) entre los cuales pasa el gas transportador de partículas. Las moléculas del gas se ionizan o sea que se disocian en iones positivos y negativos. Estos iones se adhieren a las partículas neutras que se desplazan en el flujo de gas que al quedar cargadas

son atraídos al electrodo de carga contraria a la suya propia. Así, la colección tiene cuatro etapas que son: la carga eléctrica de las partículas por ionización, el transporte de las partículas cargadas a la superficie de colección, la neutralización de las partículas cargadas que han sido precipitadas en el electrodo de colección y el desplazamiento de las partículas a la tolva colectora. Existen dos tipos de precipitadores electrostáticos, los de una y los de dos etapas.

Los precipitadores electrostáticos de una etapa o tipo Cottrell combinan la ionización y la colección en un solo paso. Pueden ser: de alambre dentro de un tubo, o de alambre entre placas paralelas, siendo en ambos casos el alambre el electrodo de descarga y el tubo o la placa los electrodos colectores.

El precipitador de dos etapas es aquel en que las partículas primero se ionizan y posteriormente pasan entre las placas en donde son colectadas.

El desplazamiento de las partículas pueden ser húmedo, mediante una película de agua que cubre permanentemente al electrodo colector o seco, ya sea: por un vibrador mecánico, por aire comprimido o por la aplicación de sustancias adhesivas al electrodo, lo que implica un lavado periódico para desplazar a las partículas.

Los precipitadores electrostáticos han resultado ser los colectores más utilizados por sus ventajas, que son las siguientes: El gran rendimiento (hasta 99.9%) para partículas de todos tamaños (las más pequeñas de 0.01 micras) y con fuertes concentraciones, la evacuación en seco de las partículas, el bajo costo de funcionamiento y conservación, la escasa pérdida de presión, la posibilidad de tratar grandes volúmenes a cualquier presión y temperatura industrial. Sus inconvenientes son el altísimo costo de instalación, el enorme espacio que ocupan y el peligro de una explosión.

Colectores húmedos.—

Los colectores húmedos, son de dos tipos principales: en los que la partícula es atrapada en una película o en un flujo líquido y aquellos en los que las partículas por colectar, al entrar en contacto con el agua incrementan su tamaño ya sea porque una pequeña partícula sólida choque con una mucho mayor (10 veces) de agua o porque sobre la superficie de la partícula sólida se condensen gotas de agua.

Vale ahora decir que todos los colectores húmedos están seguidos de otro equipo, con el que se tiene que tratar el agua lavadora para liberarla de los contaminantes y poder reciclarla, lo cual es siempre un inconveniente que incrementa los costos de limpiado.

Torres de Rocío.—

Existen dos tipos de torres de rocío: las gravitaciones y las de placa. En las torres gravitacionales un gran número de gotas líquidas caen por gravedad y actúan como obstáculo a las partículas de gas que tienen una dirección ascendente. La eficiencia de colección está en función del diámetro de la gota y de la partícula, pero nunca es muy alta y sólo se usa para partículas mayores de 500 ó 1000 micras. Tienen la ventaja de presentar una muy reducida caída de presión.

Las torres de rocío con placa, son lavadores con placas perforadas que se colocan dentro de la torre. El líquido por gravedad cae de una placa a la otra. Por los orificios asciende el gas contaminado, que al pasar desprende gotitas, de las placas.

Tanto las partículas del gas como las gotas chocan contra obstáculos que están encima de cada orificio integrándose así los contaminantes al agua. El gas sigue su ascenso hasta llegar a la parte superior de la torre de donde sale ya limpio, a la atmósfera. Se usa para partículas hasta de 0.001 micras.

Torres empacadas.—

Las torres empacadas tienen tres etapas de lavado. La inferior en que las partículas más gruesas interfieren con el rocío que cae de la parte alta de la torre precipitándose con éste. En una segunda etapa, el gas con dirección ascendente pasa a través de una sección en que hay un “lecho” de esferas u otro tipo de obstáculos en la superficie de las que escurre el agua.

El gas contaminante choca contra la película de agua y las partículas de tamaño medio son llevadas por el agua. En la última etapa, la niebla que se desprendió de la cama debido al gas ascendente recupera a las partículas más finas lográndose así una muy eficiente colección aún para minúsculas partículas de 0.001 micras.

Lavador con rocío autoinducido.—

En este equipo la colección de partículas, tiene lugar en una cortina de rocío que se forma por el mismo flujo del gas al pasar por un orificio de diseño especial. Las partículas se colectan al chocar el gas contra las gotitas del agua. Este lavador colecta partículas de 5 micras con un 90% de eficiencia, mismas que se incrementa al aumentar el tamaño de las mismas.

Tiene una caída de presión variable, de acuerdo al diseño y requiere poco mantenimiento.

Lavador Venturi.—

En el lavador Venturi el gas transportador de la materia particulada, pasa a través de un ducto que se incorpora en forma de Venturi. (Tubo cuya área se reduce paulatinamente, y que al mantener el flujo de fluido constante en un área menor, incrementa la velocidad del mismo). Se inyecta rocío de agua a la garganta del Venturi por medio de chorros radiales, mismos que se atomizan inmediatamente por la alta velocidad del gas.

Como la velocidad de entrada de las gotas es prácticamente nula respecto a la del gas, las partículas contaminantes chocan contra las gotas que luego son transportadas a un segundo paso de limpieza del agua.

La caída de presión es bastante alta y la eficiencia de colección también lo es. (Tiene una eficiencia de 97 a 99% para partículas de 0.5 micras).

CAPITULO VIII
CONCLUSIONES

Cuando la atmósfera se encuentra contaminada, en áreas de gran concentración demográfica, y cuando las condiciones climatológicas lo propician, se producen graves accidentes por contaminación aguda, que por la magnitud de sus consecuencias tiene gran influencia en los estudios y medidas para el control de la contaminación atmosférica.

La persistencia de contaminantes en el aire:

—Se pone en contacto al cuerpo humano con elementos extraños de la atmósfera y algunas veces dichos elementos pueden introducirse al organismo humano.

—Pueden ocasionar que dos o más contaminantes potencialicen su acción y provocar fenómenos que por si solos no producirían otras veces.

—Junto con las condiciones climatológicas, como la luz solar y la humedad, al actuar como catalizadores pueden transformar compuestos no dañinos, en ácidos que sí lo son.

—Los contaminantes que hay que dar prioridad de acción son:

- Metales pesados
- Dióxido de azufre
- Oxidos de nitrógeno

—Aquellos que pueden contaminar los alimentos.

En virtud de que la contaminación atmosférica actual va en aumento, es importante:

—Incrementar las estaciones de monitoreo con el objeto de obtener datos acerca de la contaminación atmosférica.

—Realizar estudios epidemiológicos.

—Correlacionar los datos de los estudios anteriores.

—Conocer con exactitud los límites aceptables de contaminación atmosférica.

—Realizar estudios y reglamentar de acuerdo a los resultados.

El costo de las inversiones en equipo, aditamentos y demás medios para evitar la contaminación, representa un esfuerzo para salvaguardar el patrimonio natural, que de otra manera se pagaría a un alto costo por el deterioro del medio ambiente. Así como, se acepta en el ámbito internacional, que los países desarrollados tienen el deber de efectuar las mayores erogaciones para el control de la contaminación, en México se considera justo que, quienes más contribuyen a la producción de contaminantes, mayor responsabilidad tienen en su control.

Se considera que la contaminación ambiental es un problema que incumbe a todos los habitantes del país, por lo que se recomienda intensificar la campaña de divulgación masiva.

Es necesario establecer que en nuestros días el control de la limpieza del aire no es un problema de carácter técnico ya que los contaminantes de diversa índole pueden ser reducidos a niveles aceptables en cualquier cosa. El problema principal es el económico y político.

Actualmente en México existen los recursos humanos y materiales para hacerle frente a los problemas de contaminación, causados por las industrias, desde su evaluación técnica y suministro del equipo adecuado hasta la instalación y puesta en marcha.

Es necesario contar con Leyes y Reglamentos aplicables a nuestro medio, así como la información técnica completa de las características del equipo disponible para las diferentes aplicaciones, esta información debe ser registrada, publicada y distribuída en todo el país por los comités establecidos para este efecto.

Es conveniente también que el gobierno establezca ciertas concesiones para la instalación del equipo de control adecuado permitiendo por ejemplo, depreciaciones aceleradas, facilidades para financiamiento o reducción de impuestos.

A cada zona industrial que produzca cualquier afluente gaseoso que puede considerarse contaminante, deberá dársele especial importancia para disminuir y controlar estos afluentes que contribuyen a la degradación de nuestro ambiente.

BIBLIOGRAFIA

- | | |
|-----------------------------------|---|
| ALAN R. SMITH | "Air Pollution"
Pergamon Press Inc, New York
1966. |
| BUTCHER S. S. | "An introduction to Air Chemistry"
Academic Press. 1972. |
| DUST COLLECTORS | Reprint of "Chemical Engineering"
Mc Graw-Hill, New York
1969. |
| EVERINMENTAL
PROTECTION AGENCY | "Introduction to Air Pollution
Control"
1972. |
| GOLDMAN M. I. | "Ecology and Economics:
Controlling Pollution in the 70s"
Prentice-Hall. 1972. |
| JIMENEZ CANTU J. | "Tesis para el Mejoramiento del
Ambiente"
Conferencia 1972. |
| LUND H. F. | "Industrial Pollution Control
Handbook"
Mc. Graw- Hill 1971. |
| ORDOÑES B. R. | "Los efectos de la contaminación
Atmosférica en la Salud del Hombre"
Rev. Salud Pública de México 1972. |
| PERRY, J. H. | "Chemical Engineers' Handbook"
Mc. Graw- Hill 1963 |
| ROOS, R. D. | "La Industria y la Contaminación
de aire"
Ed. Diana 1974. |

S. S. A.

"La Empresa Nacional ante la
Contaminación".
1974.

S. S. A.

"Reunión Nacional de Salud Pública"
Memoria 1972.

STERN C. A.

"Efficienas application And
Selection of Collectors"
Stanford Research Institute 1972.

WILLIAM SON S. J.

"Fundamentals of Air Pollution"
Addi son Wesley.
1973.