



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

17
2ej.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"

PRINCIPIOS DE LA REDUCCION DE
CONTAMINANTES INDUSTRIALES EN LAS
DESCARGAS GASEOSAS EN LA CIUDAD
DE MEXICO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
ARIEL JARAMILLO ESQUIVEL



MEXICO, D. F.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES *ZARAGOZA***

**JEFATURA DE LA CARRERA DE
INGENIERIA QUIMICA**

OF/082/003/97

**C. Ariel Jaramillo Esquivel
P r e s e n t e .**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el Examen Profesional, le comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:

Presidente: I.Q. Miguel José Flores Galaz

Vocal: I.Q. José Benjamín Rangel Granados

Secretario: I.Q. Rafael Sánchez Dirzo

Suplente: I.Q. María del Rocío Luja Hernández

Suplente: I.Q. Andrés Aquino Canchola

**A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

México, D.F., 29 de Enero 1997

**Ing. Magín Enrique Juárez Villar
Jefe de la Carrera**

A mis padres por su cariño y comprensión, mi agradecimiento y amor por siempre.

A mi esposa que siempre encontré en ella esa luz que necesité para salir adelante, por su gran tenacidad y apoyo.

A Raúl ... tú sabes lo que significa esta pausa, muchas gracias.

A mis hermanos, a todos y cada uno de ellos por respaldar mi decisión por esta carrera.

A todas y cada una de las personas que con su gran entusiasmo y ayuda hicieron posible concluir este trabajo, mi más sincera gratitud por su apoyo.

RESUMEN

El problema de la contaminación en la Ciudad de México ha venido creciendo conforme pasan los años, es por eso, que debemos poner remedio a esta mal situación, ya que de nosotros depende tener una ciudad más limpia.

La situación geográfica no ayuda mucho para poder mejorar el ambiente contaminado, por lo que es necesario implantar tecnologías en todas las industrias contaminantes (en la ZMCM) en las descargas gaseosas.

En el presente trabajo podemos observar los principios que se requieren para poder lograr nuestro objetivo, básicamente menciono dos métodos: absorción y adsorción, de los cuales se dan sus características, ventajas y desventajas, así como también los diferentes equipos que existen para cada método.

Es muy útil un capítulo incluido en este trabajo sobre ventilación industrial, porque se dispone de todos los cálculos básicos para poder instalar el sistema que nos permita capturar los materiales contaminantes después de ser generados y antes de que los gases sean descargados a la atmósfera.

Además, si alguna persona desea instalar alguna industria en la ZMCM, le presento algunas partes de la Ley Ambiental del Distrito Federal (marzo de 1997) correspondiente a la contaminación generada por fuentes fijas.

INDICE

INTRODUCCION	V
---------------------------	----------

CAPITULO PRIMERO

Características físicas de la calidad del aire en la Ciudad de México

1. Generalidades	1
2. Meteorología	2
3. Características Físicas de la ZMCM	10

CAPITULO SEGUNDO

Contaminantes Industriales Gaseosos

1. Introducción	13
2. Principales industrias contaminantes	14
3. Emisiones potenciales a la atmósfera	20
3.1. Bioxido de Azufre	22
3.2. Oxidos de Nitrógeno	28
3.3. Partículas	30
3.4. Hidrocarburos	30
3.4.1. Oxigenatos	36
3.4.2. Ozono y Oxidantes	36
3.5. Monóxido de Carbono	40
3.5.1. Bióxido de Carbono	42

CAPITULO TERCERO

Absorción

1. Introducción	44
2. Concepto	44
2.1. Desorción	47
3. Generalidades (Diseño)	48
4. Equipos de absorción	50
5. Adsorbentes	53
6. Control de la contaminación en el aire	58
6.1. Torres de relleno	58
6.2. Torres de platos	58
6.3. Depuradores Venturi	59
7. Monitoreo de contaminantes atmosféricos	60

CAPITULO CUARTO

Adsorción

1. Introducción	62
2. Concepto	63
2.1. Adsorción Física	64
2.2. Quimiadsorción	65
3. Adsorbentes	67
4. Aspectos Teóricos	71
5. Cinética de la Adsorción	76
6. Técnicas de Unidades de Adsorción	77
6.1. Contacto por etapas	79
6.2. Contacto continuo	79
6.2.1. Lechos móviles	80
6.2.2. Lechos fluidificados	80
6.2.3. Nube descendente	81
6.3. Estado no estacionario	81
6.3.1. Lechos fijos	81
7. Regeneración de los adsorbentes	82
7.1. Ciclo de oscilación térmica	83

7.2. Ciclo de oscilación de presión	83
7.3. Ciclo de desorción de un gas de purga	84
7.4. Ciclos de desplazamiento	84
7.5. Ciclos de combinación	84

CAPITULO QUINTO

Ventilación Industrial

1. Introducción	85
2. Conceptos básicos	88
3. Campanas de extracción	89
3.1. Campanas bajas	90
3.2. Campanas elevadas	91
3.3. Campanas laterales	91
3.4. Campanas cerradas	92
4. Diseño de campanas	92
4.1. Velocidad de captura	92
4.2. Velocidad de transporte	93
4.3. Perfiles de velocidad	94
4.4. Dimensiones de las campanas elevadas	96
4.5. Dimensiones de las campanas bajas	97
4.6. Pérdidas de presión	98
5. Ductos y accesorios	100
5.1. Pérdidas en los codos	101
5.2. Pérdidas en las expansiones y en las contracciones	103
5.3. Pérdidas en las conexiones	105
6. Chimeneas	107
7. Nomenclatura	110

CAPITULO SEXTO

Legislación Ambiental

1. Introducción	112
2. Ley Ambiental del Distrito Federal	120

2.1. TITULO PRIMERO "Disposiciones Generales"	120
2.2. TITULO SEGUNDO "De la Política Ambiental"	121
2.3. TITULO CUARTO "De la prevención y control de la contaminación ambiental"	124
2.4. TITULO SEXTO "De las sanciones"	125

APENDICE A

Modelo tridimensional de mesoescala aplicado a la predicción de la circulación atmosférica en el Valle de México

1. Resumen	126
2. Introducción	127
3. Descripción del modelo	128
3.1. Límite inferior	130
3.2. Límite superior	132
3.3. Fronteras lateral	133
3.4. Condiciones iniciales	133
4. Desarrollo	134

APENDICE B

1. Factores de tolerancia para emisiones basadas en un tiempo de promedio común de 24 horas	144
---	-----

CONCLUSIONES	146
-------------------------------	------------

BIBLIOGRAFIA	148
-------------------------------	------------

1. INTRODUCCION

La contaminación del aire es un factor muy predominante de la vida moderna y no es en realidad un fenómeno nuevo, sean los olores que provienen de los desechos domésticos -aguas negras y basura-, así como el humo liberado por el fuego de la cocina o del calefactor, es decir, es la consecuencia de la manera como se construyen nuestras ciudades.

La contaminación del aire es un residuo de los métodos como se producen nuestras mercancías, las transportamos junto con nosotros y de como la transportamos, de la forma de como generamos la energía para calentar e iluminar los lugares donde habitamos, nos divertimos y trabajamos.

El aire es un factor indispensable, para la vida en la Tierra, y una cuestión importante es la conservación de su pureza. Ahora bien, si concebimos la pureza del aire como su propiedad para mantener la vida, entonces, como ejemplo, el aire en la cima del Monte Everest es muy mediocre, porque basta apenas para respirar. Pero el otro extremo es el aire emitido por un motor diesel es también demasiado inferior como para respirar, aunque contiene más oxígeno por metro cuadrado (m^3) que el aire en la cima del Monte Everest. Es claro que acabamos de mencionar dos muestras de aire que son deficientes para mantener la vida, son deficientes en formas distintas; es decir, una está disminuida en cuanto a su concentración, y la otra contiene materias extrañas nocivas, por lo que se dice que está contaminada.

Durante el siglo XIX, en los países desarrollados, cambiaron los métodos de eliminación de basura, tratamiento de aguas negras o residuales, cocción domésticas y calefacción y como consecuencia disminuyeron las formas tradicionales de contaminación del aire -humo y olores- y fueron reemplazadas por un grupo nuevo de contaminantes del aire, los cuales son producto de la cambiante sociedad urbana industrial.

Claro que podemos mencionar que la causa principal de toda la contaminación del aire es la combustión, y dicha causa es esencial para el hombre. Debido a que cuando ocurre la combustión perfecta o teórica, el hidrógeno y el carbono del combustible se combinan con el oxígeno del aire para producir calor, luz, dióxido de carbono y vapor de agua. sin embargo, las impurezas del combustible, una incorrecta relación entre el combustible y el aire, o temperaturas de combustión

demasiado bajas o demasiado altas son causa de la formación de productos secundarios, tales como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, cenizas finas e hidrocarburos no quemados -todos ellos son contaminantes del aire. En conjunto, los problemas en mayor parte de contaminación del aire son hoy en día resultado de las actividades industriales y los medios de transporte, en otras palabras, consecuencia del uso de la energía.

En el pasado y en la actualidad encontramos que algunos industriales, agricultores y por que no llamarlos, contaminadores individuales, se les facilitaba descargar a la atmósfera los productos de desechos que controlarlos, sobre todo por el aspecto económico. Se debe de considerar a la contaminación del aire como un problema público, que no solo corresponde o concierne a los responsables de la contaminación sino también a quienes podrían sufrir las consecuencias, esto es, nosotros. Por lo tanto, las leyes de algunos países permiten a un individuo o grupo de individuos demandar directamente a una organización o compañía que contamine esa parte propiedad del dominio público.

El control racional de la contaminación del aire, se apoya en cuatro suposiciones básicas y generales:

1. EL AIRE ES DEL DOMINIO PUBLICO. Tal suposición es necesaria si se ha de tratar la contaminación del aire como un problema público, esto claro esta, que no solo le concierne a quienes causan la contaminación, sino también a quienes pudieran sufrir las consecuencias (nosotros).

2. LA CONTAMINACION DEL AIRE CONSTITUYE UN CONCOMITANTE¹ INEVITABLE DE LA VIDA MODERNA. Existe un conflicto entre las preocupaciones económicas y biológicas del hombre; en otro tiempo, no se reconoció este conflicto como tal, sólo después de que ocurrieron desastres debidos a contaminación del aire. Se necesita establecer sistemáticamente normas y programas a fin de conservar la atmósfera para que cumpla su función biológica más esencial.

3. SE PUEDEN APLICAR LOS CONOCIMIENTOS CIENTIFICOS PARA DELINEAR LAS NORMAS PUBLICAS. La información acerca de las fuentes y efectos de la contaminación del aire dista mucho de ser completa, y se debe de trabajar mucho a fin de crear dispositivos y métodos de control. No obstante, se

¹ Que acompaña a otra cosa u obra con ella

dispone de suficiente información para lograr reducciones considerables en los niveles de la contaminación del aire, el hombre no tiene que abandonar ni su tecnología ni su forma de vida, pero sí debe usar sus conocimientos.

4. LOS METODOS PARA REDUCIR LA CONTAMINACION DEL AIRE NO DEBEN AUMENTAR DICHA CONTAMINACIÓN EN OTROS SECTORES DEL AMBIENTE. Ciertas industrias reducen los desechos en el aire disolviéndolos en agua y vertiendo esta agua contaminada en los ríos, por ejemplo, una proposición para reducir el dióxido de azufre emitido por plantas de energía eléctrica que consumen carbón, resulta en la formación de grandes cantidades de desechos sólidos o líquidos, estos métodos no solucionan los problemas de contaminación del aire.

Los efectos de la contaminación y la calidad del aire en la Zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se explica por la cantidad de combustibles consumidos (quemados) en una zona determinada, por su calidad, por las tecnologías de combustión y control de emisiones empleadas, por el arrastre de polvos desde zonas desecadas o desprovistas de vegetación, por las condiciones meteorológicas que determinan la dispersión de los contaminantes, y por lo que define los procesos y productos de interacción entre diferentes contaminantes, que es la fisicoquímica atmosférica.

Existen factores que moldean la estructura de consumo de energía y las características tecnológicas de sectores específicos de actividad urbana, como son: servicios, transportes, generación y manejo de energéticos, industria y usos del suelo, todas las anteriores características dependen de ciertos precios, impuestos, subsidios, etc., normas y regulaciones vigentes; y capacidades institucionales llamados factores económicos.

Cuando nuestra ciudad dio un paso hacia la modernidad, la industria inyectó vitalidad a la metrópoli, ya que significó nuevos empleos y novedosos productos de consumo que facilitaron la vida de los capitalinos, además de ser una ventana a la modernidad, como ya se mencionó anteriormente la industria significó una finca de fortaleza económica y también fue el dinamismo del Valle de México, pero ocasionó muchas distorsiones que hoy bloquean sus perspectivas de viabilidad como espacio privilegiado de interacción económica y social.

El crecimiento de las plantas industriales en la ciudad que en el aspecto económico generan más del 30% del PIB (Producto Interno Bruto) de la ZMCM, y representa más de la tercera parte del valor de la producción manufacturera a nivel

nacional. La industria ha aportado muchas cosas buenas, muchas son todo lo contrario como sus impactos ambientales y urbanos que han sido considerables. Aquí trataremos todo lo relacionado con las emisiones a la atmósfera como resultado de procesos de combustión en la industria asentada en el Distrito Federal y en los 17 municipios conurbados del Estado de México.

Así como también encontraremos métodos para reducir los contaminantes gaseosos como son absorción y adsorción en donde analizaremos sus ventajas y desventajas, ya que los contaminantes industriales de las descargas gaseosas se complican por que la concentración de éstos es baja en un gran exceso de gases diluyentes inertes. Por lo que se pretende contribuir a poder mejorar el medio ambiente de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) de los contaminantes industriales (principalmente) en las descargas gaseosas.

CAPITULO PRIMERO

CARACTERISTICAS FISICAS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE MEXICO

1. GENERALIDADES

Las características físicas de la calidad del aire dependen de muchos factores meteorológicos que pueden caracterizar el comportamiento de la atmósfera en el área que se está estudiando. Cabe mencionar que la manera más sencilla y adecuada de hacer frente al problema que presenta la contaminación atmosférica, es mediante el uso de modelos matemáticos, los cuales nos ayudan a predecir la calidad del aire y nos permiten evaluar medidas de control sin la necesidad de que estas sean llevadas a la práctica.

Dentro de los factores meteorológicos, podemos encontrar las fluctuaciones de la velocidad y dirección del viento, así como también características topográficas, estabilidad de la temperatura atmosférica y las asperezas de la superficie, las cuales repercuten mucho en el grado de dilución de las emisiones por el viento.

Así, todos los contaminantes del aire emitidos por fuentes puntuales y distribuidas son transportados, concentrados o dispersos por condiciones meteorológicas y topográficas. Casi todos los contaminantes del aire se encuentran en gases, producidos por medio de la combustión, que son mucho más calientes que el aire circundante; por lo que son gases más ligeros tienden a elevarse, esto es, que los gases calientes se hacen menos densos y por consiguiente son más ligeros que los fríos.

Algunos de los modelos matemáticos manejados en la ZMCM son:

- HOTMAC: Modelo meteorológico
- RAPTAD: Modelo de dispersión atmosférica
- CIT: Modelo de reacciones químicas

Estos programas de cómputo (desarrollados por investigadores del Laboratorio Nacional de los Alamos) se emplean dentro del proyecto denominado "Estudio Global de la Calidad del Aire en la Ciudad de México" en el cual participan:

- a) El Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)
- b) El Laboratorio Nacional de los Alamos (LANL)
- c) Petróleos Mexicanos (PEMEX)
- d) La Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), ahora SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social) SECRETARIA DE ECOLOGIA
- e) El Departamento del Distrito Federal (DDF); y
- f) La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

El propósito de este proyecto es conocer a fondo las condiciones que provocan la alta contaminación atmosférica, para así poder tomar decisiones adecuadas en la aplicación de medidas de control.

2. METEOROLOGIA

Las condiciones meteorológicas y topográficas influyen en la dispersión, concentración y en el transporte de todos los contaminantes del aire emitidos por fuentes industriales. Podemos hablar que existe un ciclo en la contaminación del

aire, llamada estancia aérea, el cual consiste en los siguientes pasos: a) emisión de los contaminantes industriales, b) transporte y difusión atmosférica, c) cuando se depositan sobre la vegetación, el ganado, las superficies del suelo y del agua, y en otros objetos cuando por la lluvia son arrastrados de la atmósfera, en algunas ocasiones los contaminantes se vuelven a introducir en la atmósfera por la acción del viento, además pueden escaparse al espacio.

La topografía afecta de la siguiente manera: junto con las condiciones meteorológicas conducen a la acumulación y concentración de los contaminantes industriales, como en el caso de la Ciudad de México, ya que los contaminantes pueden dañar la salud pública y el deterioro de los edificios, así como la vegetación en el área, también encontramos cambios físicos y químicos provocados por los contaminantes que son arrastrados por el viento, como por ejemplo: El neblumo², con la consecuente irritación a los ojos, pero muchas veces estas transformaciones no siempre son dañinas, como en el caso de algunas sales minerales que son necesarias para la vida de las plantas.

La dispersión de un contaminante en la atmósfera es el resultado de 3 mecanismos dominantes:

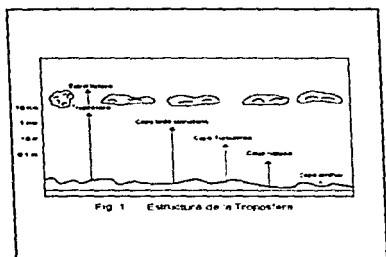
- 1) El movimiento medio general del aire que transporta el contaminante en la dirección del viento;
- 2) Las fluctuaciones turbulentas de la velocidad que dispersan el contaminante en todas direcciones; y

² Resultado de la interacción en la atmósfera de los óxidos de nitrógeno, ciertos hidrocarburos y la energía solar.

3) La difusión de masa debido a los gradientes de concentración.

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

Dentro de la tropósfera ocurren los principales fenómenos meteorológicos, así como la dispersión de los contaminantes (Fig. 1.1)



En esta capa existe un buen mezclado (en flujo turbulento), del cual depende en altura. Cuando el sol calienta la superficie de la tierra se genera un flujo

convectivo ascendente vigoroso, lo que provoca que la capa límite³ se extienda entre 1 y 2 km de altura, alcanzando su calor máximo pasando al medio día. También esta capa tiende a reducirse debido a el enfriamiento de la tierra por la noche, este enfriamiento de la tierra es más rápido que el aire y el gradiente térmico se invierte, desapareciendo el flujo convectivo y la capa límite se reduce notablemente, aproximadamente a 100 m, tomando su valor mínimo poco antes de la salida del sol por lo que la capa límite crece y disminuye rítmicamente correspondiente al ciclo solar diario, de donde se puede deducir las concentraciones mínimas y máximas de contaminantes.

La diferencia de temperatura entre la superficie de cuerpos de agua (océanos, mares, lagunas, etc.) y tierra firme e irregularidades del terreno, son factores que determinan los vientos locales por lo que es complejo la determinación de la dirección de estos vientos.

Ahora bien con lo que respecta a la contaminación atmosférica es fácil deducir los efectos de la velocidad y dirección del viento: de la velocidad del viento depende el grado de dilución de los contaminantes, de manera que a baja velocidad, el mezclado es mínimo y por lo tanto la dilución también; mientras que en la dirección del viento depende el área de afectación de los gases contaminantes.

En la ZMCM, tenemos que las zonas industriales más grandes se localizan al norte de la ciudad (Xalostoc, Vallejo, Naucalpan y Tlalnepantla), y como los vientos dominantes vienen del norte, los gases emitidos en esta zona son barridos

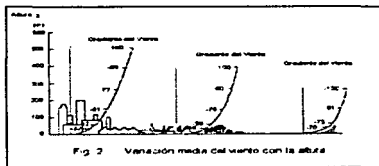
³ Se llama capa límite planetaria a la capa atmosférica dentro de la cual los patrones de viento son afectados por las irregularidades del terreno, se localiza dentro de la tropósfera.

sobre la ciudad y acumulados en el sur de la misma donde se encuentra la sierra del Ajusco que impide su salida.

Existen obstáculos que desvían la trayectoria del viento llamados rugosidad del terreno, que pueden ser: montañas, edificios, casas, árboles, etc. donde la corriente será menos uniforme que en un campo abierto o en el mar.

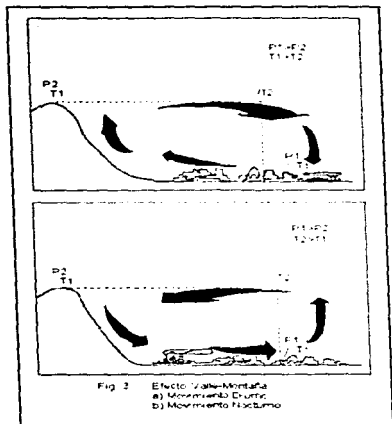
Dichos obstáculos, dependiendo de su altura, pueden provocar remolinos (turbulencias) dentro de la corriente, que afectan el mezclado y al perfil vertical del viento.

En la figura 1.2 podemos observar que el perfil del viento se ha desarrollado en un 77% aproximadamente a los 300 m, en una zona urbana con edificios altos, en una zona rural a esa misma altura se ha alcanzado el 90% y en el mar se tiene un desarrollo total.



La diferencia de presiones y temperatura que existen entre el fondo de un valle y la cima de una montaña es la trayectoria local del viento como consecuencia de la topografía llamada efecto valle-montaña.

El gradiente de presiones atmosféricas es más fuerte que el gradiente térmico, durante el día, es por eso que, la circulación está regida por el gradiente de presiones, formándose un sistema valle-montaña, por la noche el gradiente térmico del aire predomina sobre la diferencia de presiones atmosféricas formándose así un sistema montaña-valle (fig. 1.3)



El gradiente vertical de la temperatura atmosférica es de gran importancia en la determinación del transporte de las masas de aire, y por tanto en la distribución de contaminantes. El comportamiento de la temperatura en las capas de aire cercanas a la superficie de la tierra es muy heterogénea, tanto horizontal como verticalmente. El gradiente vertical de temperatura se genera porque la tierra se calienta más rápidamente que el aire o agua y el aire en contacto con el suelo está más caliente que el que se encuentra más alejado. Por lo tanto, el gradiente de temperatura dentro

de la capa límite disminuye conforme aumenta la altura, $dT/dz < 0$.

El comportamiento anterior sucede en el día, pero durante la noche la situación se invierte, pues la tierra se comporta como un cuerpo negro que al no recibir energía la comienza a ceder, enfriándose más rápidamente que el aire, hasta que ocasionalmente el gradiente térmico vertical observado es inverso al que sucede durante el día, conociéndose a este proceso como inversión térmica, $dT/dz > 0$.

La inversión térmica es un fenómeno natural de gran importancia dentro de la cuenca de México. Su origen puede deberse a diferentes procesos meteorológicos: topografía (efecto valle-montaña), encuentro frontal de masas de aire, anticiclones⁴, radiación y advección.

Finalmente podemos considerar otro factor meteorológico de importancia, la humedad. El vapor de agua no es contaminante, pero por alterar el medio ambiente su evaluación es de importancia dentro de un estudio de contaminación atmosférica. La humedad del aire afecta la visibilidad, además de actuar pasiva o activamente en más de un proceso fisicoquímico productor de contaminantes.

3. CARACTERISTICAS FISICAS DE LA ZMCM

⁴ Área de alta presión, entorno a la cual giran los vientos, con movimiento circular (hacia la derecha en el hemisferio Norte y hacia la izquierda en el hemisferio Sur).

La Cuenca de México se encuentra comprendida entre los paralelos 19 01'18" y 20 09'12" de latitud norte y entre los meridianos 98 31'58" y 99 30'52" de longitud oeste, a una altitud mínima de 2,235 msnm y máxima de 3,960 msnm, contando con una superficie de 9,560 km².

La región geográfica de la Cuenca de México esta rodeada de sierras, constituyendo una cuenca cerrada o endorreica⁵, es decir, aquella en que los ríos y arroyos que escurren desde las partes altas desaguan en una llanura lacustre⁶ dando lugar a ciénegas⁷.

Más de la mitad del territorio de la ZMCM presenta un relieve accidentado: hacia el Norte formando la Sierra de Guadalupe, al Este la Sierra de Santa Catarina, y al Suroeste las Sierras de las Cruces Ajusco y Chichinautizin. Dentro de estas sierras las mayores elevaciones se presentan en el Sur y al Norte: al Sur con la Cruz del Marqués a 3960 msnm, el Pico del Aguila a 3880 msnm que forman los picos del volcán Ajusco, el Tláloc de 3690 msnm y el volcán Pelado de 3500 msnm, entre otros; al Norte, en la Sierra de Guadalupe, con los Cerros Chiquihuite y Zacatenco de 2730 y 2550 msnm respectivamente.

El resto de la ZMCM son terrenos semiplanos formados por los que fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco. Dentro de esta planicie, que se localiza a una elevación promedio de 2235 msnm, se encuentran prominencias topográficas aisladas, como el Cerro de la Estrella, el Peñón y el Cerro de Chapultepec entre

⁵ Que no desagua al mar si no en lagunas interiores.

⁶ Que vive sobre un lago o a orillas de él.

⁷ Sitio llano de cieno o lodo, lodazal.

otros de menor elevación.

En cuanto a la inversión térmica, ya se menciona que ésta es un fenómeno común en ZMCM, en donde se presentan dos tipos de ellas: una es a consecuencia de su posición dentro de una cuenca, presentándose la inversión por topografía o efecto valle-montaña y la otra es por la pérdida de calor por radiación, conocida como inversión por radiación, Bravo (1987).

Las inversiones térmicas normalmente no duran más de cinco horas después de que el sol ha salido. cuando se prolongan, puede dar lugar a situaciones graves especialmente cuando su duración es mayor de 24 horas. cuando la Cuenca de México se ve invadida por masas de aire polar continental, durante el invierno, es frecuente que las inversiones térmicas duren más de 5 horas y su altura sea pequeña, requiriendo de más tiempo de calentamiento solar para romperse.

Es muy importante observar que durante las horas pico de la mañana (7:00 - 10:00), las inversiones térmicas persisten, haciendo que los índices de contaminación lleguen a niveles alarmantes, por lo que es recomendable evitar los congestionamientos vehiculares y no realizar ejercicios durante esas horas.

La topografía es uno de los parámetros de mayor importancia para la vinculación de patrones de viento y en HOTMAC se incluye detalladamente esta información.

Las variables numéricas relacionadas con usos del suelo (tipo de terreno) aparecen en las ecuaciones de balance de energía del suelo; siendo las de mayor importancia la emisividad de la superficie, E, y su difusividad térmica, Ks.

(específicas de cada material: concreto, arcilla, agua, pasto, follaje, etc.).

Para calcular la temperatura del suelo es necesario conocer la posición geográfica de la zona de estudio a partir de la cual se evalúa la radiación solar incidente; pero ya que la ecuación empleada no maneja términos fuente, no es posible considerar la existencia de puntos calientes (fuentes artificiales de calor: industrias, centros urbanos, etc.).

En el apéndice A se muestra el modelo tridimensional de mesoescala aplicado a la predicción de la circulación atmosférica en el Valle de México.

CAPITULO SEGUNDO

CONTAMINANTES INDUSTRIALES GASEOSOS

1. INTRODUCCION

El aire es indispensable para la vida en la tierra, por lo tanto, es importante conservar la pureza del mismo. La envoltura predominante que rodea la tierra en su atmósfera y la materia de que consta es el "aire", si concebimos la pureza del aire como su propiedad para mantener la vida, entonces el aire en la cima del Monte Everest es muy mediocre, porque hasta apenas para respirar, pero en la Ciudad de México el aire emitido por un motor diesel, por ejemplo, es también demasiado inferior para respirar, aunque contiene más oxígeno por m³ (metro cúbico) que el aire en la cima de Monte Everest. La diferencia de estas dos muestras de aire radica en que una está disminuida en cuanto a su concentración (Monte Everest), y la otra contiene materias extrañas nocivas, por lo que se dice que está **contaminada**.

Gran parte de las materias extrañas nocivas provienen de las industrias del Valle de México, a pesar de que se inyectó vitalidad a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), de que ofreció empleos y una ventana a la modernidad (la industria genera más del 30% del Producto Interno Bruto (PIB) de la ZMCM, y representa más de la tercera parte del valor de la producción manufacturera a nivel nacional), sin embargo, sus impactos ambientales y urbanos han sido considerables.

Las emisiones de combustión de empresas grandes (más de 250 empleados) y medianas (de 101 a 250 empleados) que consumen ya sea, combustóleo y gasóleo

o gas natural (así como también almacenamiento y manejo de combustibles, y emisiones de los procesos industriales) reflejan la responsabilidad de distintas ramas. Las emisiones asociadas a la combustión del diesel (utilizado preponderadamente por la pequeña y por la microindustria) y a los procesos productivos (en muchos casos generan cantidades significativas de partículas y de hidrocarburos) marcan las principales fuentes contaminantes de la ZMCM.

2. PRINCIPALES INDUSTRIAS CONTAMINANTES

Los siguientes grupos se construyeron uniendo ramas industriales para simplificar la clasificación de empresas multiproducto y para resaltar algún tipo de industria importante, desde el punto de vista ambiental. Las ramas cuya importancia a nivel regional es pequeña, se encuentran dentro del rubro: otras industrias, junto con empresas no identificadas.

Los 11 grupos son los siguientes:

- a) Celulosa y Papel
 - b) Industria Textil
 - c) Industria Química
 - d) Industria del Vidrio
 - e) Alimentos y Bebidas
 - f) Cerámica y otros Minerales no metálicos
 - g) Metálica Ferrosa
 - h) Maquinaria y Equipo
 - i) Industria del Hule
 - j) Metálica no Ferrosa
-

k) Otras Industrias

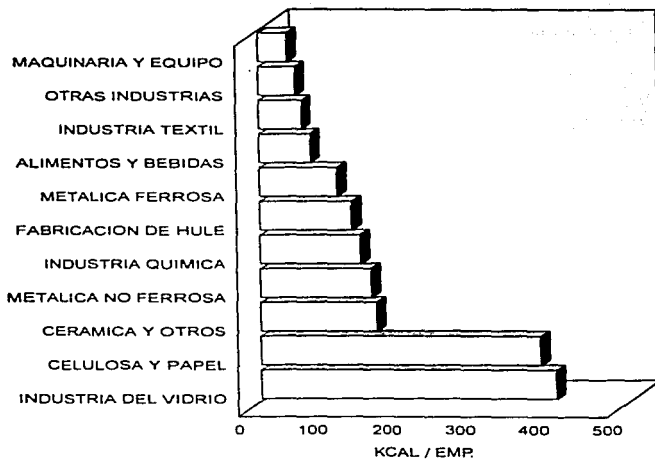
La industria cementera no se incluye debido a que sólo existe una planta en el Valle de México, los datos sobre su consumo de combustibles son dudosos y cuenta con equipo avanzado de control de emisiones, por lo que es difícil saber con exactitud la cantidad de contaminantes que genera. El sector industrial analizado consume alrededor de 25 billones de kilocalorías anuales provenientes del gas natural y combustóleo (o gasóleo). La industria que consume más combustible son los fabricantes de vidrio, utilizan cerca de 5 billones de kilocalorías al año (22% del total del sector industrial). Le siguen celulosa y papel con un consumo anual de 4.4 billones (18%), y la industria química con casi 4 billones (16%). El restante 44% se divide entre los demás sectores.

La gráfica 2.1 nos muestra la rama industrial con mayor relación energía/empleado (industria del vidrio). Por cada empleado se utilizan anualmente 400 millones de kilocalorías, junto con la industria de la celulosa y el papel (380 millones Kcal/emp) constituye el grupo de alta relación energía/trabajo.

El grupo medio lo constituyen la industria química, los fabricantes de cerámica y otros productos de minerales no metálicos, la industria metálica ferrosa y no ferrosa y los fabricantes de hule. Todas estas industrias consumen entre 110 y 160 millones de kilocalorías por empleado anualmente. El resto de las ramas industriales están por abajo de 60 millones de Kcal/emp. El promedio de la industria es de 125 millones de kilocalorías anuales por trabajador.

De los 25 billones de kilocalorías que consume la industria de la ZMCM a partir del combustóleo, gasóleo y gas, 30% proviene de los primeros y 70% del

segundo, lo cual confirma que la industria en la ZMCM es más intensiva en gas natural que en combustóleo. Sin embargo, hay diferencias importantes entre las distintas ramas.



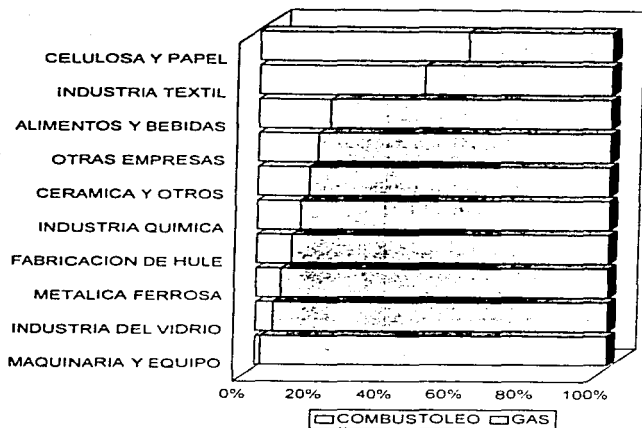
GRAFICA 2.1. KILOCALORIAS ANUALES UTILIZADAS POR EMPLEADO, POR RAMA INDUSTRIAL.

FUENTE: QUADRI DE LA TORRE G, LA CIUDAD DE MEXICO Y LA CONTAMINACION ATMOSFERICA, LIMUSA, MEXICO 1992.

Cada rama industrial tiene patrones diferentes de uso de combustibles; hay algunas intensivas en gas y otras intensivas en gasóleo o combustóleo, lo cual explica en buena medida la composición de sus emisiones contaminantes a la atmósfera.

En la gráfica 2.2 se observa que la industria de la celulosa y papel es la única rama donde la mayor parte de la energía proviene del gasóleo o del combustóleo. La industria textil y de fibras sintéticas está próxima a obtener la mitad de su energía de cada tipo de combustible. Pero el resto de las ramas utilizan de manera principal el gas natural (más del 75%).

La industria de la ZMCM consume alrededor de 537 millones de litros anuales de combustóleo y gasóleo; 49% de este volumen lo utiliza la industria de la celulosa y del papel. La tercera rama en importancia en el consumo de estos energéticos es la textil con 16%. El resto se reparte aproximadamente en partes iguales entre las demás industrias. Únicamente la rama de metálica no ferrosa no consume estos combustibles. El volumen anual de gas natural consumido por la industria mediana y grande en la ZMCM es de aproximadamente 1933 millones de metros cúbicos (m³). Su consumo está menos concentrado que en el caso del combustóleo. Las dos principales ramas en el consumo de gas natural son la industria del vidrio y la química. La primera utiliza 26% del total y la segunda 19%.



GRAFICA 2.2. INTENSIDAD EN EL USO DE COMBUSTOLEO POR RAMA INDUSTRIAL.

FUENTE: QUADRI DE LA TORRE G, LA CIUDAD DE MEXICO Y LA CONTAMINACION ATMOSFERICA, LIMUSA, MEXICO 1992.

3. EMISIONES POTENCIALES A LA ATMOSFERA

Al evaluar las emisiones que provienen de la combustión en la industria conviene hablar de emisiones potenciales. Esto es importante si se tienen en cuenta las variaciones estacionales en la producción y la existencia de sistemas de control de emisiones. En 1991 Pemex inició en la ZMCM la venta de gasóleo en sustitución de combustóleo, las emisiones de bióxido de azufre y partículas serán menores en el caso del gasóleo que es un combustible más ligero que el combustóleo. No se consideran las emisiones de combustión de diesel y las generadas por procesos industriales diversos (típicos especialmente en la emisión de partículas e hidrocarburos). En esta razón estriba, fundamentalmente, la variación entre las emisiones potenciales determinadas.

La tabla 2.1 nos presenta los factores de emisión para los procesos de combustión. En donde, con base en esta información se determinaron las emisiones potenciales en términos de UTE^a como unidad de cuenta, destacando el elevado grado de concentración de las emisiones en unas cuantas ramas.

^a UTE: Unidad de Toxicidad Equivalente (ver apéndice B).

TABLA 2.1

FACTORES DE EMISION PARA PROCESOS DE COMBUSTION			
Contaminante	Combustible (ml l)	Diesel (ml l)	Gas Natural (ml m3)
SOx(Kg)	76	42.5	0.0096
NOx(Kg)	6.6	2.4	8.8
Particulas (Kg)	5.38	0.24	0.48
HC(Kg)	0.154	0.066	0.044
CO(KG)	0.6	0.6	0.64

FUENTE: Banco Mundial y Departamento del Distrito Federal, Short Term Program DDF-WB Air Pollutants Emissions Inventory for Mexico City Metropolitan Area, inédito, México 1990.

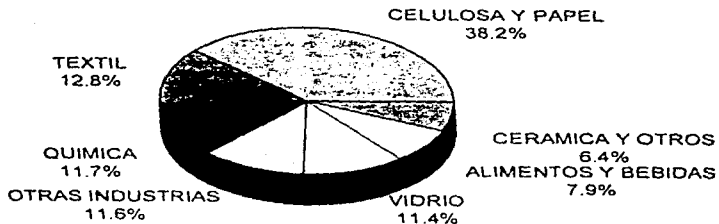
En la gráfica 2.3 se aprecia que una rama industrial (celulosa y papel), es responsable del 38% de los UTE emitidos por el sector industrial

La segunda rama industrial en importancia por su emisión de UTE es la industria textil, ésta contribuye con 13%, le siguen química y vidrio con aproximadamente 23% del total, las anteriores 4 industrias son contaminadores medios. La industria de alimentos y bebidas, los fabricantes de cerámica y otros productos de minerales no metálicos y metálica ferrosa forman un grupo de pequeños emisores, con una participación de entre 7% y 3%. Las restantes ramas (industria metálica básica y productos metálicos no ferrosos, fabricantes de maquinaria y equipo y los productores de hule) forman el grupo de emisores marginales con participaciones menores al 1.5%.

Un análisis de la contribución de las diferentes ramas industriales se desglosan a continuación para cada contaminante.

3.1. BIXIDO DE AZUFRE (SO₂)

La industria muestreada es responsable potencial de la emisión anual de 41 mil toneladas de SO₂ principalmente a partir de la combustión de combustóleo y/o gasóleo, y en mucho menor medida del gas natural. De ellas el 49% las emite la industria de celulosa y papel, el 16% se debe a la producción de textiles. El resto se reparte entre las demás ramas industriales. Esta gran disparidad se debe a que existe una gran concentración equivalente en el consumo del combustóleo y gasóleo, precursores de la emisión de SO₂.



GRAFICA 2.3. PARTICIPACION DE LAS DISTINTAS RAMAS EN LA EMISION DE UTE DEL SECTOR INDUSTRIAL.

FUENTE: BANCO MUNDIAL Y DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL, SHIRT TERM PELLRAM DDF-WBAIR POLLUTANT EMISSIONS INVENTORY FOR MEXICO CITY METROPOLITAN AREA, INEDITO, MEXICO D.F. 1990.

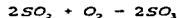
De acuerdo a la información presentada el bióxido de azufre (SO_2) es el elemento que más contribuye a la contaminación industrial, producto del combustible y gas, representa el 58% del total de UTE emitidos al año por el sector industrial.

Se produce SO_2 cuando se quema azufre o un combustible que lo contiene, o cuando minerales de azufre, tales como el sulfuro de cobre, se "tuestan" en el aire.



Puesto que el azufre está presente en el carbón y el petróleo, la combustión de estos materiales para fines de calefacción y de energía produce SO_2 .

Otro importante oxido de azufre, el trióxido de azufre (SO_3), es producido en la atmósfera por la oxidación del SO_2 bajo la influencia de la luz solar.



Además algo de SO_3 se introduce directamente a partir de los procesos de combustión juntamente con SO_2 . La humedad del aire reacciona rápidamente con SO_3 para formar una nube de ácido sulfúrico.



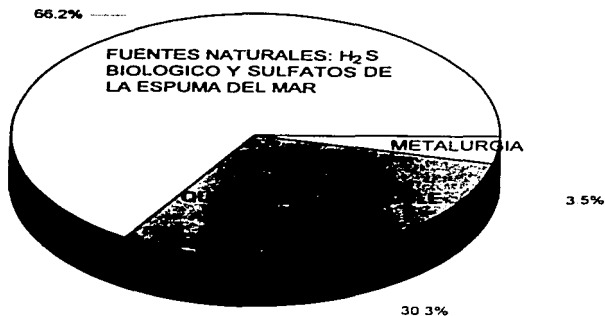
Cuando estas conversiones tienen lugar, el material inicialmente introducido en la atmósfera se designa como un contaminante primario del aire. Los nuevos materiales producidos por reacción química en el aire se designan como contaminantes secundarios del aire.

Las concentraciones de SO_2 en el aire varían dentro de un margen amplio, según los lugares, durante las diversas estaciones del año y en días y horas distintas. Por ejemplo, los niveles medios en la atmósfera rural o en ciudades "limpias" serán inferiores a 0.01 ppm, en tanto que, en los distritos muy industrializados, un promedio típico de un día podrá ser de 0.1 ppm y, en un día muy malo, el nivel podrá inclusive subir hasta 0.5 ppm. Las concentraciones elevadas de esta clase representan importantes peligros para la salud.

La conversión de SO_2 a H_2SO_4 produce una nube atmosférica fuertemente ácida que corroe metales, destruye tejido vivo y medias de nylon y deteriora diversos materiales de construcción (principalmente el mármol). La nube de ácido sulfúrico del aire consta de gotitas que suelen medir de 1 a 4 micrómetros de diámetro, tamaño particular que favorece la penetración profunda del ácido en los pulmones.

La gráfica 2.4 muestra que las fuentes de origen humano sólo representan aproximadamente una tercera parte del total de azufre atmosférico de la tierra.

Otro compuesto importante que contiene azufre es el sulfuro de hidrógeno, H_2S , su olor característico es el de huevos podridos, ennegrece la pintura de plomo y es más venenoso que el monóxido de carbono. La presencia de H_2S en concentraciones nocivas suele relacionarse con algunas fuentes específicas, tales como materia orgánica en descomposición, aguas negras o alguna operación industrial.



GRAFICA 2.4. CONTAMINANTES GASEOSOS DE AZUFRE DE TODAS FUENTES, EN MILLONES DE TONELADAS METRICAS DE AZUFRE POR AÑO.

FUENTE: TRATADO DE ECONOMIA, "CONTAMINACION DEL AIRE", TURK, TURK WITTES, WITTES 1979.

Debe señalarse la enorme atención que se le ha prestado al bióxido de azufre y como se ha abatido mediante el mejoramiento y cambio de combustibles realizados por Petróleos Mexicanos. De hecho, únicamente en 1989 se registró un nivel significativo de excedencias, y desde 1993 no se han observado violaciones a la norma (0.13 ppm, 1 hora).

Las siguientes medidas han probado ser eficaces para mantener el bióxido de azufre dentro del intervalo permisible⁹:

- ◆ Sustitución parcial de combustóleo por gas natural en las termoeléctricas Jorge Luque y Valle de México, y en algunas industrias.
- ◆ Sustitución parcial de combustóleo por gasóleo industrial de menor contenido de azufre.
- ◆ Reducción del contenido de azufre en el diesel.
- ◆ Cierre de la refinería 18 de Marzo.

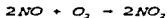
3.2. OXIDOS DE NITROGENO (NOx)

Anualmente la industria muestreada genera potencialmente 21 mil toneladas de NOx en la ZMCM. Su producción se reparte más equitativamente entre las distintas ramas industriales que la de SO₂, debido a que, tanto el uso del gas como del combustóleo resulta en la emisión de este contaminante. La industria del vidrio, la química y los fabricantes de celulosa y papel son las tres ramas que más NOx

⁹ La atmósfera oxidante que prevalece en la zona metropolitana, propicia igualmente la transformación del bióxido de azufre en sulfatos y ácido sulfúrico.

emiten a la atmósfera, y en conjunto representan más del 50%. En la ZMCM representa el segundo contaminante industrial en importancia, después del SO_2 , constituye el 33% de los UTE emitidos por la industria por combustión de gas y combustóleo.

Los óxidos de nitrógeno más importantes que se encuentran en el aire como contaminantes son: el óxido de nitrógeno (NO), y el bióxido de nitrógeno (NO_2). Ambos son producidos por procesos de combustión que tienen lugar en el aire, debido a que alguna oxidación del nitrógeno atmosférico se produce a temperaturas de la llama¹⁰:



El NO_2 es un gas pardo rojizo, cuyo olor penetrante puede descubrirse a concentraciones por encima de aproximadamente 0.1 ppm y contribuye por consiguiente al color "parduzco" y al olor de algunas atmósferas urbanas contaminadas.

Al considerar la toxicidad de los óxidos de nitrógeno, suele bastar centrar la atención en el NO_2 , porque el NO es convertido en NO_2 en el aire, además se estima

¹⁰ Es una temperatura hipotética que se alcanzaría si el compuesto fuese quemado adiabáticamente.

que el bióxido es aproximadamente 4 veces más tóxico que el monóxido, a la concentración que se encuentra en la atmósfera el óxido nítrico no es irritante y no se le considera como un peligro para la salud, sin embargo, al oxidarse se convierte en bióxido de nitrógeno que sí representa un riesgo para la salud. Los efectos de este sobre el hombre van desde un olor desagradable y una irritación moderada a una congestión pulmonar seria y a la muerte, según las concentraciones de NO_2 y la duración de la exposición.

3.3. PARTICULAS

Las partículas emitidas por la combustión, son el contaminante de mayor toxicidad. Debe recordarse que únicamente se requieren 150 kilos de éstas para formar un UTE, a diferencia de los 340 de SO_2 o los 11300 de CO . Se registra una producción anual de 2984 toneladas de partículas que representan 9% de los UTE generados. La mitad de las partículas son potencialmente producidas por la industria papelera.

3.4. HIDROCARBUROS (HC)

La producción potencial de hidrocarburos (HC) por combustión de gas y combustóleo en la ZMCM es menor a las 200 toneladas anuales. El bajo volumen y toxicidad los hace poco significativos en la ponderación final. Representan menos del 1% de la contaminación total industrial por combustión, pues no se incluyen en el análisis las emisiones de proceso de compuestos orgánicos volátiles, que son los más importantes.

Los hidrocarburos son compuestos de carbono e hidrógeno cuyo número de átomos de carbono por molécula va de una (metano, CH_4), a centenares o millares (alquitranes y los asfaltos). El metano es un componente normal de aire; en sus concentraciones atmosféricas corrientes no es tóxico. El "gas natural" utilizado como combustible es, con la mayor frecuencia, el metano.

Los octanos son hidrocarburos componentes de gasolina representativos; hay 18, y todos ellos tienen la misma fórmula C_8H_{18} . Sus puntos de ebullición van desde 99°C a 126°C , lo que implica que pueden evaporarse fácilmente y persistir como vapores en el aire. Por regla general, cuanto mayores son las moléculas, tanto menos volátil es la sustancia y, por consiguiente, las concentraciones atmosféricas de hidrocarburos gaseosos mucho más pesadas que los octanos son insignificativamente pequeñas.

En estudios recientes se han encontrado elevadas concentraciones de hidrocarburos en la atmósfera de la Zona Metropolitana, con un origen muy variado. Entre otras causas, son el resultado de las emisiones de un sinnúmero de fuentes distribuidas en toda la ZMCM, incluyendo gases de escape de los automóviles, evaporación de gasolina, proceso industriales, distribución de gas LP, aplicación de disolventes a nivel doméstico y de servicio, e incluso la vegetación.

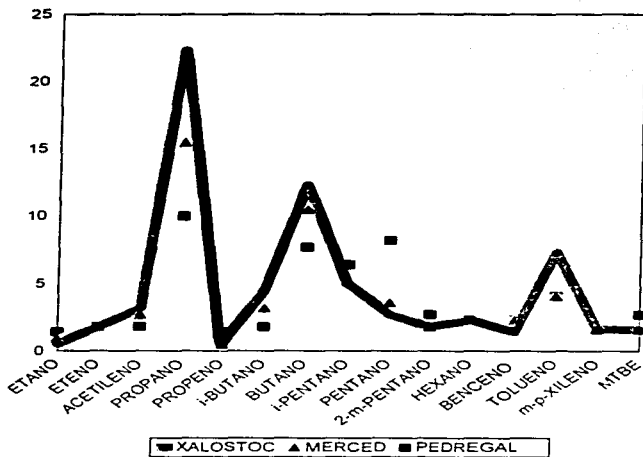
En promedio, la concentración de hidrocarburos sin metano o compuestos orgánicos reactivos encontrada en las muestras tomadas en el Valle de México es de 3.5 ppm medido como carbono (ppmC), con picos de hasta 7.1 ppmC. Este último nivel está dos veces por arriba de las concentraciones más elevadas encontradas en el Sur de California, donde se presentan los problemas de ozono más severos de los Estados Unidos.

La importancia de los compuestos orgánicos volátiles presentes en la atmósfera radica en su potencial de formación de ozono y en su toxicidad. Información basada en estudios realizados en diversas ciudades de los Estados Unidos indican que el etileno presenta el índice de 100 en la escala de reactividad conocida como RIM¹¹, con una concentración en la atmósfera de 83 ppbC¹², y un Potencial Fotoquímico¹³ de 289.5. En contraste, el propano, que se encuentra en grandes cantidades en la atmósfera (389 ppbC), presenta un potencial fotoquímico menor. Actualmente, se realizan estudios para precisar información bajo las condiciones de la Ciudad de México.

¹¹ RIM: Reactividad Máxima Incremental.

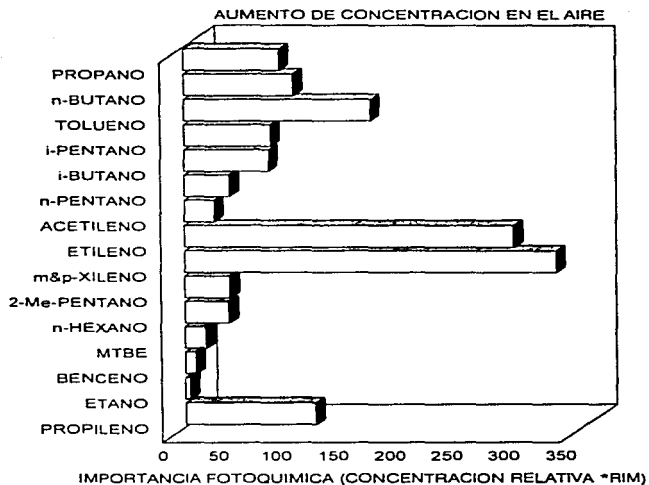
¹² ppbC: Partes por billón medidos como carbono.

¹³ Abarca cualquier efecto químico relacionando con la emisión o absorción de radiaciones de cualquier tipo. Esta definición incluye fenómenos tales como llamas, fluorescencia, reacciones fotográficas, reacciones químico-luminiscentes de todos los tipos, catálisis de reacciones químicas mediante la acción de la luz y efectos químicos producidos por el paso de partículas nucleares de alta energía a través del sistema.



GRAFICA 2.5. HIDROCARBUROS EN LA ATMOSFERA DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO (ZMCM)

FUENTE: D.D.F.



GRAFICA 2.6. IMPORTANCIA FOTOQUIMICA DE LOS COV15 EN LA ZMCM.

FUENTE: LABORATORIO QUIMICA AMBIENTAL, IMP.

En México todavía no se establecen normas oficiales que regulen las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV), así como tampoco se han fijado criterios de calidad del aire para estos compuestos, por lo que su regulación futura será muy importante para la estrategia de control de ozono.

Como consecuencia de los trabajos realizados en el Instituto Mexicano del Petróleo y por investigadores de la Universidad de California en los últimos tres años, se han detectado en la Zona Metropolitana concentraciones relativamente alta de hidrocarburos asociados con fugas en el manejo, distribución y uso de gas doméstico (gas licuado de petróleo).

Actualmente el gas licuado de petróleo es una mezcla de compuestos como propano, butano y, en mucho menor proporción, butilenos; el que predomina es el propano, el butano es ligeramente más fotorreactivo¹⁴ que el propano.

En forma preliminar y con un alto grado de incertidumbre, se estima que las fugas de gas licuado de petróleo son responsables de entre un 20% y 30% del ozono que se forma en el Valle de México. Una respuesta efectiva y factible de realizarse por parte de Petróleos Mexicanos consiste en reformular la composición del mismo, disminuyendo su contenido de butano y butilenos.

¹⁴ Que reacciona con la luz.

3.4.1. OXIGENATOS

Estos son compuestos que contienen carbono, hidrógeno y oxígeno; incluyen clases tan conocidas como los alcoholes y los ácidos orgánicos. Semejantes sustancias son producidas por la combustión incompleta de hidrocarburos tales como la gasolina y el diesel. Otro origen de los oxigenatos es el de la evaporación de solventes a partir de diversas operaciones industriales.

3.4.2. OZONO Y OXIDANTES

El ozono, O_3 , se encuentra en cierta cantidad en el aire "normal", pero a concentraciones más altas, es una sustancia tóxica. La concentración máxima que un trabajador industrial sano puede tolerar en una jornada de ocho horas es de 0.1 ppm.

El ozono es una sustancia química reactiva que se utiliza en ocasiones para desodorizar gases de escape (como los que emanan del tratamiento de las aguas negras), oxidándolos en productos menos ofensivos para el olfato antes de liberarlos hacia la atmósfera. Las concentraciones de ozono para semejante tratamiento van de 10 a 20 ppm. Concentraciones de este tipo no tardarían en hacerse fatales en el ser humano. El ozono producido por los aparatos domésticos es demasiado diluido (alrededor de 0.1 ppm) para afectar los olores corrientes del hogar en algún grado perceptible.

Las altas concentraciones de ozono constituyen hoy en día el principal problema de contaminación atmosférica en el Valle de México. De acuerdo con análisis estadísticos recientes, en los últimos 3 años los niveles de este contaminante

han demostrado una cierta tendencia a estabilizarse, situación contraria al incremento generalizado que se registró en la mayor parte de la ciudad entre 1986 y 1991. No obstante, las concentraciones de ozono superan frecuentemente la norma de calidad del aire, alcanzando niveles que superan en más de un 100% el límite establecido.

Como se aprecia en la gráfica 2.7, las concentraciones de ozono alcanzaron en 1992 los niveles más críticos registrados hasta ahora, cuando tuvimos 11 días por encima de los 300 puntos Imeca¹⁵ (más de 3 veces la normal) y se alcanzaron valores de hasta 398 imeca. A partir de entonces, los niveles máximos de este contaminante han tendido a disminuir; en 1994 y 1995 no se registraron niveles de ozono mayores a 300 imecas.

La frecuencia y severidad de contingencias atmosféricas ha mostrado también una tendencia a disminuir. Sin embargo, la ciudad y sus habitantes seguimos sufriendo en nuestra salud y en el entorpecimiento de nuestras actividades cotidianas, los efectos indeseables asociados con niveles de ozono superiores a 250 puntos Imeca. En 1991 se alcanzó un máximo histórico de 56 días con concentraciones superiores a este nivel, en 1994 y 1995 todavía se alcanzaron 4 y 6 días respectivamente.

¹⁵ IMECA : Índice Metropolitano de la Calidad del Aire.

CONTAMINANTES INDUSTRIALES GASEDOSOS

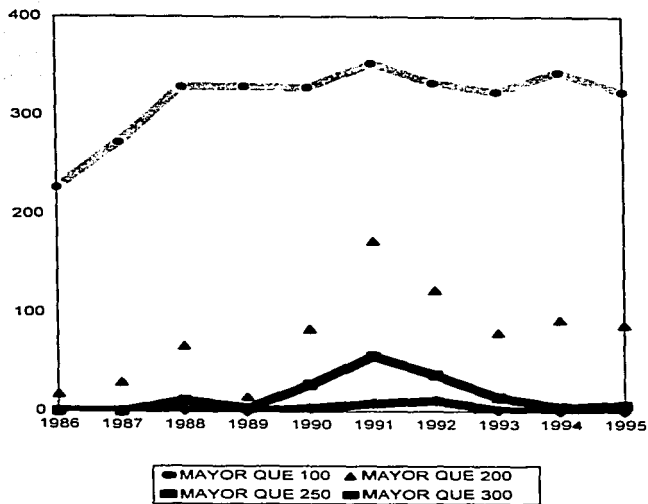
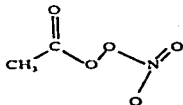


TABLA 2.2

NUMERO DE DIAS CON LECTURAS INECA SUPERIORES A LOS 100, 200, 250 Y 300 PUNTOS (1988 - 1995) (OZONO)				
AÑO	MAYOR QUE 100	MAYOR QUE 200	MAYOR QUE 250	MAYOR QUE 300
1988	329	67	11	1
1989	329	15	3	0
1990	328	84	27	3
1991	353	173	56	8
1992	333	123	37	11
1993	324	80	14	1
1994	344	93	4	0
1994	324	88	6	0

FUENTE: Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), DDF.

Existen otros gases contaminantes diversos químicamente afines al ozono, que se designan colectivamente como "oxidantes". Las propiedades que poseen en común comprenden determinados efectos nocivos o tóxicos e irritantes en las personas, diversas clases de daños en la vegetación y la capacidad de producir grietas en el caucho natural.

Ejemplo de un oxidante:

Nitrato de peroxiacetico, $C_2H_3O_5N$, oxidante componente del smog.

3.5. MONOXIDO DE CARBONO (CO)

Las concentraciones encontradas que presenta este contaminante en microambientes como en las banquetas de calles con intenso tránsito vehicular privados y públicos, así como el interior de estos vehículos son mucho mayores que las concentraciones medidas simultáneamente en las estaciones fijas de análisis continuo, esto significa que, a pesar de que no exceda la norma a nivel de la estación, puede haber un número considerable de personas que se vean expuestas a niveles peligrosos de este contaminante, tal como se comprobó en dos estudios extensos realizados por la USEPA¹⁶ en las ciudades de Denver y Washington, D.C.¹⁷

¹⁶ USEPA: United States Environmental Protection Agency.

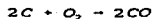
¹⁷ US EPA, (1992). Air Quality Criteria for Carbon Monoxide. Research triangle Park N. C. office of health and environmental assessment. Environmental Criteria an Assessment Office. USEPA.

Es importante mencionar que luego de revisar la información científica disponible, la USEPA ratificó en 1992, como norma de calidad del aire para monóxido de carbono, un valor de 9 ppm para un promedio móvil de 8 horas. En un individuo promedio este nivel de exposición se traduce en niveles de carboxihemoglobina¹⁸ (COHb) cercanos al 2%. Estudios de laboratorio han demostrado efectos deletéreos¹⁹ en sujetos enfermos de la arteria coronaria a niveles de COHb de 2% y 2.9%. Estos hallazgos sugieren que convendría revisar el estándar recientemente adoptado en México (11 ppm para 8 horas).

El monóxido de carbono, CO, es un producto de la combustión incompleta del carbono, o de compuestos del carbono. El CO es conocido como un gas incoloro, inodoro y que no produce irritación, pero que es, con todo, muy tóxico. Leemos acerca de muertes accidentales debidas a CO que se propaga por un cuarto desde un calentador defectuoso de gas, o de suicidios llevados a cabo permaneciendo la persona en un garage cerrado, con un automóvil con el motor en marcha. La mayor parte del monóxido de carbono en la atmósfera de la tierra proviene, sin embargo, de fuentes naturales y, concretamente de la oxidación del metano que es emitido por la materia orgánica en descomposición y, en menor grado directamente de la descomposición y el desarrollo de clorofila. En conjunto, las fuentes naturales de CO representan más del 90% del nivel mundial medio, de entre 0.1 y 0.5 ppm. Puesto que la concentración mundial de CO es relativamente estable, ha de existir algún mecanismo para su eliminación o, en otros términos, ha de circular el agente reactivo principal de esto parecen constituirlo unos microorganismos en la tierra ordinaria, en tanto que la tierra esterilizada es ineficaz.

¹⁸ Angostamiento de los vasos sanguíneos hacia el corazón (elevada enfermedad cardíaca coronaria), provocados por contaminantes que contienen carbono y oxígeno.

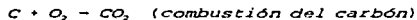
¹⁹ Reducción del tiempo en el que se presenta ataque de angina.



Estos hechos no implican que el CO atmosférico sea siempre benigno, en efecto, los promedios globales no se aplican, por ejemplo, a ciudades en donde de 95 a 98 % de CO proviene de la quema de combustible por el hombre y en donde los niveles dominantes pueden ser de 50 a 100 veces mayores que el de la corriente intensa de tránsito en una autopista de varios carriles se situará alrededor de 25 a 50 ppm. La concentración de CO en el escape mismo puede alcanzar el 3%, o 30000 ppm. La concentración máxima que pueden tolerar trabajadores sanos en la industria durante una jornada de ocho horas es de 50 ppm. Una concentración de 1000 ppm puede producir inconciencia en una hora y la muerte en 4 horas.

3.5.1. BIOXIDO DE CARBONO (CO₂)

El bióxido de carbono, CO₂, es un componente normal del aire y una parte del ciclo del carbono de la biósfera, por consiguiente, no se le suele considerar como contaminante. Sin embargo, la combustión de carbón, petróleo y gas natural, como combustibles, produce grandes cantidades de CO₂. Las ecuaciones químicas pueden verse a continuación.



La velocidad presente del aumento de la concentración mundial de CO_2 es de aproximadamente 0.7 ppm por año. Los gases atmosféricos que absorben los rayos infrarrojos son: el ozono, el agua y el bióxido de carbono, el agua desempeña el papel principal en la absorción de los rayos infrarrojos, porque es tan abundante. El ozono es el menos importante de los gases, porque está presente en pequeña cantidad, el bióxido de carbono (CO_2) es importante también, debido especialmente a que nuestra combustión de materiales fósiles produce cada vez mayores cantidades del mismo, de modo que su concentración en la atmósfera va aumentando. Esta tendencia hace prever un calentamiento de la temperatura de la superficie de la tierra. Necesitamos saber qué es lo que realmente tiene lugar y qué puede ocurrir si seguimos quemando combustibles fósiles.

Las concentraciones de CO_2 en cualquier región fluctúa entre la noche y el día en aproximadamente 70 ppm durante la temporada de cultivo. En años recientes se han medido las concentraciones de CO_2 en regiones polares y en altas montañas, lugares donde no varían tanto. Nuestro cálculo mejor es que la concentración mundial de CO_2 ha aumentado de 10 a 15% durante el siglo pasado, esto es, de aproximadamente 280 ppm a su nivel actual de 315 ppm.

CAPITULO TERCERO

ABSORCION

1. INTRODUCCION

La eliminación de los contaminantes de las descargas gaseosas se complica a menudo porque, en general, la concentración de éstos es baja en un gran exceso de gases diluyentes inertes. Por lo que es necesario encontrar procesos que eliminen el contaminante a estas bajas concentraciones, o que lo concentren en otra fase.

2. CONCEPTO

La absorción es el proceso en el cual el contaminante gaseoso se concentra en otra fase, en este caso, el contaminante se concentra en un líquido. La selección y diseño de la unidad de separación depende no sólo del equilibrio químico y de la cinética de las reacciones químicas, sino también de las propiedades físicas y de transporte de las diversas especies que intervienen. Estos fenómenos de transporte son comunes a todos los procesos e incluyen los efectos de transferencia de materia y de energía. Los factores económicos repercutirán también en la selección del tipo de proceso utilizado y cabe que planteen limitaciones al diseño de determinadas unidades. Así, en el tratamiento de grandes volúmenes de gas, los costes de bombeo pueden ser elevados y la minimización de las pérdidas de presión ser de capital importancia.

La absorción de los gases en los líquidos es una de las técnicas más utilizadas para controlar la composición de los gases residuales industriales antes de su

descarga a la atmósfera. En general, los gases residuales son mezclas de componentes gaseosos, algunos de los cuales son solubles en una fase líquida seleccionada, y la mayor parte constituye un gas portador prácticamente insoluble. El contacto directo del gas con el líquido hace que la transferencia de materia ocurra entre las dos fases en direcciones controladas básicamente por los gradientes de concentración de los componentes individuales. En la mayoría de los casos, la absorción de un componente va acompañado simultáneamente por la desorción de otro (por ejemplo, absorción de SO_2 en una solución acuosa acompañada por desorción de agua). Se consigue deliberadamente una desorción con un cambio de las condiciones físicas (elevación de la temperatura, disminución de la presión), arrastre (desorción) con un gas inerte o por descomposición química del absorbente. La absorción seguida de la desorción constituye uno de los medios básicos de establecimiento de una operación cíclica con sensibilización del absorbente. Este esquema actúa como una instalación para separación y concentración del gas seleccionado.

La absorción de gases involucra la transferencia de un componente soluble, presente en una fase gaseosa, hacia un líquido absorbente de baja volatilidad. En el caso más simple de absorción de gases, no existe vaporización del líquido absorbente y el gas contiene sólo un constituyente soluble. Por ejemplo, al poner en contacto una mezcla de aire y amoníaco con agua líquida a temperatura ambiente, el agua absorbe amoníaco. Este es soluble en agua, mientras que el aire es poco soluble en ella. A su vez, el agua no se evapora en cantidades apreciables a temperaturas ambiente. Como resultado, la única masa que se transfiere es la del amoníaco, que pasa de la fase gaseosa a la líquida. El amoníaco, al transferirse al líquido, va aumentando su concentración en este medio hasta que el amoníaco disuelto se encuentra en equilibrio con el que está presente en la fase gaseosa. En el momento

en que se alcanza este equilibrio cesa la transferencia neta de masa.

En los casos de absorción más complejos, pueden absorberse muchos componentes así como vaporizarse una parte de líquido absorbente. En los equipos de absorción, el líquido absorbente se encuentra a una temperatura inferior a su punto de burbuja²⁰, mientras que la fase gaseosa está muy por encima de su temperatura de rocío²¹. Una diferencia entre la destilación²² y la absorción de gases que en esta última, las fases líquida y gaseosa no contienen por lo general exactamente los mismo componentes. En la absorción, los efectos caloríficos se deben al calor de dilución²³ del gas absorbido, a diferencia de los calores de vaporización²⁴ y condensación²⁵ involucrados en la destilación.

En las operaciones de absorción, es necesario añadir un componente al sistema (esto es, el líquido absorbente). En muchos casos, el soluto deberá separarse del absorbente, para lo cual se requerirá una columna de destilación, un desabsorbedor o algún otro proceso de separación.

²⁰ Es la temperatura a la cual una mezcla líquida con una composición dada comienza a hervir al elevarse dicha temperatura.

²¹ Es la temperatura a la cual una mezcla de vapor comienza a condensarse al enfriarla.

²² Es la separación de dos componentes volátiles de una mezcla líquida por medio de calor.

²³ Es la cantidad de calor que debe suministrarse a una cantidad unitaria que se encuentra en su punto de ebullición, para cambiar su estado de líquido a gaseoso.

²⁴ Es la cantidad de calor que debe suministrarse a una cantidad unitaria que se encuentra en su punto de ebullición, para cambiar su estado de líquido a gaseoso.

²⁵ Es la cantidad de calor que debe ser cedida por una cantidad unitaria de sustancia gaseosa en el punto de ebullición para convertirse en líquido.

2.1 DESORCIÓN

La desorción es el proceso inverso, es decir, eliminación de un componente de la fase líquida por contacto con una fase gaseosa.

La desorción o agotamiento, es lo opuesto a la absorción. En este caso, el gas soluble se transfiere del líquido a la fase gaseosa, debido a que la concentración en el líquido es mayor que la correspondiente al equilibrio con el gas. Por ejemplo, el amoníaco puede agotarse de una solución acuosa mediante el burbujeo de aire fresco a través de la mezcla. El aire que entra no contiene amoníaco, mientras que el líquido sí lo contiene, de tal forma que la transferencia se verifica del líquido al gas.

La absorción y el agotamiento se utilizan con frecuencia en la industria química. El ácido clorhídrico se produce por la absorción en agua del cloruro de hidrógeno gaseoso. La fermentación aerobia²⁶ de los sedimentos y lodos de aguas negras requieren la absorción de aire. La carbonatación de refrescos involucra la absorción de bióxido de carbono; al abrir una botella, disminuye la presión y se presenta algo de desorción.

Tanto la absorción como el agotamiento se llevan a cabo en equipos de etapas múltiples y en menos grado, en equipo de contacto continuo.

²⁶ Transformación que sufren gran número de sustancias orgánicas en determinadas circunstancias y que se traduce por una oxigenación o una hidratación.

3. GENERALIDADES (DISEÑO)

El diseño de una nueva unidad o la valoración de una planta ya existente se basa siempre en conocer el caudal total de gas y su composición de entrada. Las condiciones del gas de salida tratado podría fijarse por necesidades ambientales, factores económicos o por una combinación de ambos. Los principales objetivos de la valoración de cualquier caso particular son:

1. Elegir la fase líquida más aconsejable considerando la selectividad, saturación y estabilidad requeridas.
2. Estimar las concentraciones límites (eficacias) y el equilibrio de materias de la operación total.
3. Seleccionar un aparato apropiado para el contacto gas-líquido.
4. Estimar los principales parámetros de diseño, tales como superficie y volumen del contacto, razón diámetro-longitud y pérdida de presión requerida.
5. Estimar los costes del capital, y de operación.

La selección de un disolvente líquido aconsejable y la determinación de los límites de la eficacia de la absorción se basan en los datos de solubilidad. En la mayoría de los casos no se dispone de fórmulas para calcular la solubilidad y sólo cabe utilizar datos tabulados o gráficos. En la tabla 3.1. se resumen las expresiones

más frecuentemente empleadas para las concentraciones de las fases gaseosas y líquidas de sistemas binarios.

TABLA 3.1.

UNIDADES DE CONCENTRACION DE GAS Y LIQUIDOS UTILIZADOS EN ABSORCION		
	GAS	LIQUIDO
PRESION PARCIAL	p_A	-
FRACCION MASICA	-	U_A
CONCENTRACION MOLAR (MOL VOLUMEN ⁻¹)	$C_A = \frac{p_A}{RT}$	$C_A = U_A \frac{1}{\mu_A}$
FRACCION MOLAR	$y_A = \frac{p_A}{p_A + p_i}$	$x_A = \frac{U_A \mu_B}{1 \cdot U_A \mu_B + (1 - U_A) \mu_B}$
RAZON MOLAR	$Y_A = \frac{p_A}{p_i} \frac{y_A}{1 - y_A}$	$X_A = \frac{U_A \mu_B}{1 - U_A \mu_A} = \frac{x_A}{1 - x_A}$

ρ = densidad media; $\mu_{A,A}$ = peso molecular; p_i = presión parcial de los gases inertes.

FUENTE: Albert Parker, "Contaminación del aire por la industria", Reverté S.A., 1983, ESPAÑA.

4. EQUIPOS DE ABSORCIÓN

En la tabla 3.2 se han resumido los tipos usuales de equipos de absorción con comentarios sobre la disponibilidad de los datos de velocidad de transferencia y tipos de flujo.

La aplicación de los principios esquematizados del diseño de la capacidad de un absorbedor, en cualquier caso particular, requiere datos experimentales de velocidades de transferencia de materia.

Se utilizan, por ejemplo, para torres de platos, datos de dos eficacias directamente definidas. La más sencilla es una eficacia global, relativa a la unidad de absorción completa, que se expresa como la razón del número de platos teóricos al suficiente número de platos reales para alcanzar la separación requerida.

ABSORCIÓN

TABLA 3.3

CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES DE ABSORCIÓN			
TIPO	DISPOSICIÓN TÍPICA DEL FLUJO	VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL GAS (PRESIÓN ATMOSFÉRICA) (m/s)	OBSERVACIONES
Torres de relleno: alfileres, anillos raschig, rejillas de madera, etc.	corrientes	0,3 - 1,5	Datos dinámicos para la mayoría de los sistemas, principal importancia de la distribución uniforme del líquido, intervalo L/G ²⁷ limitado
Torres de platos: campanas de burbujeo, platos perforados, etc.	corrientes global corrientes cruzadas en el plato	0,3 - 1,5	Valoración comparativa sencilla, cambio de escala limitado, intervalo L/G amplio
Dispersión hidrodinámica: pulverización, celdas, lavador tipo venturi	corrientes cruzadas o en paralelo	1,5 - 12	Datos basados limitados, difícil cambio de escala, intervalo L/G amplio
Dispersión mecánica: tanques agitados, lavador de feld		0,3 - 1	Datos basados limitados, tamaño limitado por las partes mecánicas móviles
Lecho fluidizado: lecho turbulento de esferas huecas, bolas de vidrio	corrientes cruzadas y corrientes	1,5 - 7	Desarrollo creciente

FUENTE: Peabir, Albert. "Contaminación del Aire por la Industria". Reverte S.A., 1983, ESPAÑA.

²⁷ En la relación del régimen de flujo total de la corriente líquida, (mol/t) entre el régimen de flujo en masa del vapor, (M/t).

CAPÍTULO TERCERO

Para un diseño detallado de los absorbedores, se dispone directamente de muchos datos para los sistemas importantes industrialmente (Hobler, Morris y Jackson, Nonhebel, Norman, Riesenfield y Kohl, Danckner). Los aspectos tecnológicos y de equipo también se describen en una serie de procesos químicos y revisiones del control de la contaminación publicados por Noyes Data Corporation y en un manual de Calvert, Sakol y Schwartz han considerado los problemas específicos de los materiales de construcción.

TABLA 3.3

PROCESO	ALIMENTACION	AGENTE DE SEPARACION	PRODUCTOS	PRINCIPIOS DE SEPARACION	EJEMPLO PRACTICO
Absorción	Gas	Líquido no volátil	Líquido + vapor	Solubilidad preferencial	Eliminación de CO ₂ y H ₂ S de gas natural por absorción en etanolamina

NOTA: Calvert, Sakol, M.C.E., P.D., "Practical Handbook of Environmental Control", CRC PRESS, Inc., 1967, p. 141.

TABLA 3.5.

SOLVENTES ADECUADOS PARA VARIOS GASES CONTAMINANTES	
GAS CONTAMINANTE	SOLVENTES ADECUADOS
Dióxido de Azufre	Hidróxido de Sodio, Sulfito de Sodio, Óxido de Magnesio, Carbonato de Calcio, Óxido de Calcio y soluciones de Hidróxido de Calcio
Oxidos de Nitrógeno	Bicarbonato de Amonio, Bisulfito de Potasio, Hidróxido de Calcio, Hidróxido de Magnesio y soluciones de Hidróxido de Sodio
Sulfuro de Hidrógeno	Soluciones de Hidróxido de Sodio e Hidróxido de Potasio
Cloruro de Hidrógeno	Soluciones de agua, Amonio, Hidróxido de Calcio e Hidróxido de Magnesio
Fosgeno	Hidróxido de Sodio y Agua
Mercaptanos	Soluciones de Hipoclorito de Sodio

FUENTE: C.S. Rao, "Environmental Pollution control Engineering", edit. John Wiley & Sons, 1991, NEW DELHI, INDIA.

ABSORCIÓN

TABLA 3.6

DISPOSITIVOS DE ABSORCIÓN					
EFECTIVIDAD DE DIFERENTES COMPUESTOS ABSORBIENDO DIOXIDO DE AZUFRE DE GASES CONTAMINANTES					
TABLA A 99% ABSORBANCIA DE 2000 PPM SO ₂ A 265°F					
AMBIENTE	FASE CRISTALINA ANALISIS RAYOS X	PUREZA, PESO %	DENSIDAD g/cm ³	ML ABSORBIDO 0.100 g AMBIENTE	PREPARACION
Oxido de Manganeso	MnO ₂	97	0.14	33	NH ₄ Cl, S.F.L. MnO ₂ , Lavado y secado a 130°C
Oxido de Calcio	CaO	97	0.66	25	Na ₂ CO ₃ CuO ₂ , Lavado y secado a 130°C calentado al vacío a 300-340°C por 20 horas
Oxido de Manganeso	MnO ₂	96	0.30	23	MnO ₂ Lavado y secado a 130°C calentado al vacío a 300-340°C por 20 horas
Oxido de Manganeso	Mn ₂ O ₃	96	0.67	19	Na ₂ CO ₃ Mn ₂ O ₃ , Lavado, secado a 130°C y calentado a 300-340°C por 20 horas
Oxido de Aluminio-hidro	Al ₂ O ₃ , H ₂ O	73 25	0.54	18	Na ₂ CO ₃ Al ₂ (SO ₄) ₃ , Lavado, secado a 130°C y calentado con H ₂ a 300-340°C por 20 horas

CAPITULO TERCERO

Óxido de Calcio	CaO,	100	0.06	12	NaCl CaCl ₂ NaOH Líquido, secado a 130°C y calcinado al vacío a 360°C. 340°C por 30 horas
Óxido de Cromo verde	Cr ₂ O ₃ , Na ₂ O	70 30	0.91	12	Na ₂ CO ₃ Cr ₂ (SO ₄) ₃ Líquido, secado a 130°C y calcinado con H ₂ a 430-440°C por 30 horas
Óxido de Níquel	NiO	91	0.76	9	Na ₂ CO ₃ NiSO ₄ Líquido, secado a 130°C y calcinado al vacío a 375-340°C por 30 horas

NOTA: Óxido de Bismuto (Bi₂O₃); Óxido de Vanadato (V₂O₅); Óxido de Plomo (PbO); Óxido de Zinc (ZnO); e Hidróxido de Calcio (Ca(OH)₂). Todos los óxidos de 1 gramo de Dióxido de Azufre por cada 100 g de carga.

6. CONTROL DE LA CONTAMINACION EN EL AIRE

La absorción del gas es comúnmente conducida en un equipo, el cual es diseñado para proporcionar contacto íntimo entre dos fases. El contacto entre el líquido y el gas puede ser acompañado por dispersión del líquido en el gas o viceversa. Algunos de los absorbedores comúnmente usados para el control de la contaminación en el aire son: Torres de relleno, torres de platos y torres de dispersión y depuradores de gas tipo venturi.

6.1 TORRES DE RELLENO

Las torres de relleno son aparatos muy eficientes de absorción con un contacto continuo entre dos fases. Estos usan una gran variedad de materiales de relleno especialmente los diseñados de cerámica rellenos de grava. El líquido es distribuido en el relleno, el cual proporciona una gran superficie de área interfacial y fluye bajo la superficie de relleno en forma de capas delgadas o corrientes subdivididas. Normalmente, el líquido y el gas fluyen a contracorriente, es decir, en dirección contraria uno del otro, el gas fluye hacia arriba y el líquido fluye hacia abajo. El uso de las torres de relleno solo se limita para la limpieza de los gases, como un precipitador o condensador.

6.2 TORRES DE PLATOS

En las torres de platos siempre ocurre contacto entre el líquido y el gas. El líquido es introducido en la parte superior de la torre en forma de cascadas por

etapas, y eventualmente es retirado desde la parte baja de la torre. El gas fluye en dirección contraria a la caída del líquido. En cada plato, el gas pasa a través de pequeños agujeros perforados o debajo de tapas ranuradas inmersas en el líquido, formando burbujas. La absorción toma lugar durante la formación de la burbuja y esta sube a través del líquido. En las torres rociadoras el flujo es normalmente a contracorriente y cruzado.

El líquido es introducido por una boquilla rociadora y otro equipo atomizador, el cual forma gotitas. Estas gotitas suministran la superficie de la transferencia de masa. Las torres rociadoras son usadas para absorción de gases altamente solubles y partículas sólidas presentes en el gas.

6.3 DEPURADORES VENTURI

En los depuradores venturi el gas y el líquido fluyen en una misma dirección. El líquido absorbente es introducido por el cuello del venturi y la dispersión del líquido es realizada por la alta velocidad de vapor de gas. El resultado marca una gran área interfacial del depurador venturi como un absorbedor extremadamente eficiente. La energía requerida para alcanzar dicha eficiencia es considerable.

En el control del aire contaminado, el medio más popular de o para la limpieza del gas son las torres de relleno; porque las torres de platos, de dispersión y los depuradores de gas venturi son usadas en casi 10% de los casos. Con respecto al diseño y construcción de equipo de absorción existen diversos textos de ingeniería

química que se pueden consultar²⁸.

Los efectos de la contaminación atmosférica pueden detectarse en la salud humana, en la vegetación, en animales o en materiales. Sin embargo, con base a estas observaciones no se puede determinar en todos los casos de que contaminante se trata. Por lo tanto, es de suma importancia contar con un equipo analítico cualitativo y cuantitativo que no sólo especifique cuál es el contaminante, sino también su concentración en el ambiente.

7. MONITOREO DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

El monitoreo del aire consta de dos procesos: el de muestreo y el análisis de contaminantes atmosféricos. El muestreo es el proceso por el cual las muestras son colectadas, mientras que el análisis involucra métodos para determinar las concentraciones de los contaminantes en una muestra de aire.

Para poder medir los niveles de los contaminantes, es necesario contar con métodos que produzcan resultados comparables, es decir que sean específicos, sensibles, estables, precisos y exactos, por lo que la medición de los niveles señalados para los contaminantes de interés se debe llevar a cabo aplicando métodos de referencia (tabla 3.7), o bien sus equivalentes.

²⁸ - MADDIX, ROBERT N., "Transferencia de Masa, Fundamentos y Aplicaciones", Prentice Hall, 1984, MEXICO. - OWENS, W. R., AND R. N. MADDIX, *Ind. Eng. Chem.*, 60, No. 12, 14 (1968). - PARKER, ALBERT, *Contaminación del Aire por la Industria*, Editorial Reverté S.A., 1983, ESPAÑA. - SUJATA, A.S., *Hydrocarbon Process. Petro. Refiner.*, 40, No. 12, 137 (1961).

Los métodos y los instrumentos para la medición de contaminantes atmosféricos deben ser cuidadosamente seleccionados, evaluados y normalizados.

TABLA 3.7

METODOS DE REFERENCIA DE LA ZMCM		
CONTAMINANTE	METODO DE REFERENCIA	PRINCIPIO DE DETECCION
SO ₂	Pararosanilina	Colorimétrico
CO	Espectrometría de infrarrojo no dispersiva	Infrarrojo
Oxidantes fotoquímicos (Ozono)	Quimicolominiscencia	Quimicolominiscencia
Hidrocarburos (no metano)	Cromatografía de gases	Ionización de flama
NO ₂	Quimicolominiscencia	Quimicolominiscencia

FUENTE: Comisión Nacional de Derechos Humanos. "La contaminación Atmosférica en México, sus causas y efectos en la salud", 1992, MEXICO.

CAPITULO CUARTO

ADSORCION

1. INTRODUCCION

La adsorción es un proceso en que los gases, vapores o líquidos se concentran en una superficie sólida como resultado de fuerzas de superficie o químicas. Estos sólidos, denominados adsorbentes, sirven para separar gases o vapores de corrientes gaseosas. El grado de adsorción varía con la naturaleza y carácter del sistema adsorbente-adsorbato. Cabe utilizar el adsorbente sólo una vez y luego desecharlo, o bien, emplearlo y luego reactivarlo (proceso conocido como regeneración). Las moléculas adsorbidas sobre una superficie están mantenidas por fuerzas de dicha superficie. Estas fuerzas pueden ser de naturaleza física, denominándose entonces **Adsorción Física**, o química conocida como **Quimiadsorción**. En la tabla 4.1 se resumen las principales propiedades de los dos tipos de adsorción.

La adsorción es un proceso de separación que se basa en la capacidad que tienen ciertos sólidos para remover en forma preferencial, componentes gaseosos (o líquidos) de una corriente. Las moléculas del gas o vapor contaminantes, presentes en una corriente residual, se acumulan en la superficie del material sólido. Al medio adsorbente sólido se le llama con frecuencia **adsorbente**, mientras que el gas o vapor adsorbido se le llama el **adsorbato**. Además de contribuir a la deshumidificación del aire y otros gases la adsorción es útil en la remoción de olores y contaminantes objetables, procedentes de gases industriales, así como en la recuperación de vapores de solventes valiosos del aire y otros gases. La adsorción es una técnica especialmente útil en los casos en que:

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

La adsorción hace también posible económicamente purificar gases que contienen sólo pequeñas cantidades de contaminantes, los que resultan difíciles, si no imposibles de purificar por otros medios.

2. CONCEPTO

La adsorción implica la transferencia de un constituyente de un fluido a la superficie de una fase sólida, para completar la separación, el constituyente adsorbido debe separarse del sólido, la fase fluida puede ser un gas o un líquido, si varios constituyentes se adsorben en distintas proporciones, casi siempre es posible separarlos en componentes relativamente puros.

Puesto que la adsorción es un fenómeno de superficie, sólo sirven aquellos sólidos que contienen mucha superficie interna, ya que la superficie externa de sólidos incluso muy finamente divididos es, relativamente pequeña. Los adsorbentes típicamente comerciales tienen áreas superficiales de 50 a 500 m²g⁻¹, con un radio medio de poro de -10 a 1000 Å. Otras propiedades del adsorbente ideal son:

1. Estar disponible fácilmente a un coste razonable para reducir los costes de reposición por pérdidas.
-

2. **Regenerarse fácilmente.**
3. **Ser químicamente inerte al componente global portador de la corriente gaseosa. Tener asimismo adecuada resistencia física y dureza a fin de minimizar las pérdidas por desgaste.**
4. **Elevada capacidad para la sustancia que ha de adsorber, de otro modo el tamaño de la unidad de adsorción sería muy antieconómico. Una gran selectividad es una ventaja útil si hay varios componentes en la corriente fluida que se ha de tratar.**

2.1 ADSORCION FISICA

Las moléculas de gas se adhieren a la superficie del adsorbente sólido como resultado de las fuerzas atractivas intermoleculares entre ellas (fuerzas de Van der Waals). El proceso de adsorción es exotérmico. El calor liberado que depende de la magnitud de la fuerza atractiva, es del orden de la entalpía (o calor) de condensación del vapor. Por lo general, está dentro del rango de 2 a 20 Kj/g. mol. La ventaja de la adsorción física se apoya en el hecho de que el proceso es reversible. Al bajar la presión del adsorbato en la corriente de gas o elevando la temperatura, el gas adsorbido es fácilmente desadsorbado sin cambio en la composición química. El efecto de temperatura es el que se usa. Esta característica de reversibilidad es extremadamente importante si resulta económicamente deseable la recuperación del gas adsorbido o la recuperación del adsorbente, para volver a utilizarlo. La cantidad de gas que se adsorbe físicamente decrece rápidamente con

la creciente temperatura crítica²⁹ del componente adsorbido. Por lo general, la adsorción es directamente proporcional a la cantidad disponible de superficie sólida. No obstante, esta acumulación no está limitada a una capa monomolecular; cierto número de capas de moléculas se pueden acumular en la superficie. Otra característica conveniente de la adsorción física es que la tasa es por lo general muy rápida.

2.2. QUIMIADSORCIÓN

La adsorción química o quimiadsorción es el resultado de una interacción entre el adsorbato y el medio adsorbente. La fuerza de unión asociada con este tipo de adsorción es mucho más fuerte que para la adsorción física, por tanto, el calor liberado durante la adsorción química es mucho mayor que el liberado durante la adsorción física, por ejemplo, del orden de un entalpia de reacción (calor). Esta puede encontrarse dentro del rango de 20 a 400 kJ/g·mol. Debido a este elevado calor de adsorción, la energía asociada con las moléculas adsorbidas químicamente es significativamente diferente de la asociada con las moléculas presentes en la corriente de gas. Por tanto, la energía (o activación) requerida para que las moléculas adsorbidas químicamente reaccionen con otras especies moleculares, podrá ser considerablemente menor que la energía requerida cuando las dos especies reaccionan directamente en la fase gaseosa. Este requerimiento más bajo de energía

²⁹ Es la temperatura a la cual la concentración molecular y todas las restantes propiedades se hacen iguales en líquido y vapor. Por encima de esta temperatura la sustancia es un gas y no se licuará bajo ninguna presión por elevada que sea. Para licuar un gas, primeramente debe enfriarse por debajo de su temperatura crítica, después debe elevarse su presión por encima de su presión de vapor a esta temperatura.

es una de las bases de la explicación del efecto catalítico de las superficies sólidas de aumentar de tasa de algunas reacciones químicas. Existe otra diferencia importante además de ser un proceso más altamente exotérmico, la adsorción química es también con frecuencia irreversible.

Al experimentar la desadsorción, la naturaleza química habrá experimentado un cambio. Si es conciente, ya sea la recuperación del adsorbente o la recuperación del adsorbato, se habrá de seleccionar de tal manera que el proceso de adsorción física sea el que controle. Por otra parte, es el proceso de adsorción química el que es responsable del efecto catalítico. La catálisis es un proceso extremadamente importante en cierto número de sistemas de control de la contaminación del aire.

Cuando la tasa de adsorción química varía con la temperatura, la adsorción se conoce como adsorción química activada, cuando la adsorción química tiene lugar muy rápidamente, la adsorción química se conoce como adsorción química no activada. Finalmente, otra característica distintiva de la adsorción química es que sólo una capa monomolecular de adsorbato aparece sobre el medio adsorbente. Este efecto se debe a las distancias extremadamente cortas sobre las que son efectivas las fuerzas de valencia que vinculan el adsorbato con el adsorbente.

TABLA 4.1

COMPARACION DE LA ADSORCION FISICA Y QUIMIADSORCION		
	ADSORCION FISICA	QUIMIADSORCION
Fuerzas implicadas	Fuerzas de Van der Waals	Fuerzas de valencia química
Intensidad de la unión	Como la cohesión en un líquido	Enlaces químicos
Velocidad a la que se alcanza el equilibrio	Muy rápida	No necesariamente rápida, las energías de adsorción pueden ser grandes
DH	Exotérmica	Exotérmica
Reversibilidad	Normalmente compleja y rápida	Puede ser lenta o irreversible
Especificidad	Pequeña	Grande

FUENTE: Parker Albert, "Contaminación del Aire por la industria", Editorial Reverte S.A., 1983, ESPAÑA.

3. ADSORBENTES

Se utilizan muchos adsorbentes sólidos. Estrictamente hablando, el término adsorbente se aplica a un sólido que retiene al soluto en su superficie por la acción de fuerzas físicas. Un ejemplo sería la adsorción de vapores orgánicos en carbón. Las fracciones ligeras del gas natural se separan en la industria mediante un lecho móvil de adsorbente. Muchos otros procesos industriales utilizan lechos fijos y procesos cíclicos o intermitentes, en lugar de equipo de etapas múltiples, debido a

la dificultad de mover el sólido.

Las mallas moleculares son adsorbentes sintéticos especiales para separar mezclas por diferencias del tamaño, polaridad o saturación de enlaces carbono³⁰ de las moléculas. Por ejemplo, las moléculas de agua son relativamente pequeñas y tienen una polaridad elevada, por lo que se adsorben en forma preferencial en adsorbentes tales como las mallas moleculares. Estos adsorbentes son útiles para secar gases y líquidos; las mallas moleculares se utilizan para separar parafinas normales de corrientes de hidrocarburos en refinerías de petróleo, que se usan en la fabricación de detergentes biodegradables.

En la tabla 4.2 se indican los adsorbentes de uso industrial hoy día más importantes y sus aplicaciones. Vista esta tabla se comprueba que con la adsorción pueden efectuarse muchas separaciones.

³⁰ Las fórmulas de los hidrocarburos parafínicos de cadena abierta responden a la fórmula general C_nH_{2n+2} . A los 20°C los 4 primeros son gases; del C_5H_{12} al $C_{16}H_{34}$ son líquidos, y los superiores al $C_{16}H_{34}$ sólidos. Estos hidrocarburos se encuentran en el petróleo y en el gas natural. Todos son combustibles, ardiendo completamente a dióxido de carbono y agua o, parcialmente, en presencia de una cantidad limitada de oxígeno, a gas y carbono o monóxido de carbono. Son inertes frente a ácidos y bases; son prácticamente insolubles en agua; la pequeña cantidad que se disuelve no se ioniza dando iones de hidronio, por tanto, no son ácidos.

TABLA 4.2.

USOS MODERNOS DE LOS ADSORBENTES	
ADSORBENTE	USOS INDUSTRIALES IMPORTANTES
Tierra de Fuller	Decoloración de fracciones del petróleo, de aceites comestibles
Bauxita	Percolación de fracciones del petróleo, deshidratación de gases
Carbón de huesos	Refino de azúcar
Carbón activo	Decoloración de sustancias orgánicas e inorgánicas, recuperación de disolventes, eliminación de olores industriales y gases nocivos, purificación de gases industriales, caretas antigás, purificación de hidrocarburos, hipersorción ³¹
Alumina activada	Deshidratación y líquidos de gases
Gel de Sílice	Deshidratación y purificación de gases, caretas antigás
Tamices moleculares	Adsorción selectiva de moléculas polares, tales como H ₂ O, CO ₂ , NH ₃ , C ₂ H ₂ , H ₂ S y SO ₂ .

FUENTE: Parker Albert, "Contaminación del Aire por la industria", Editorial Reverte S.A., 1983, ESPAÑA.

³¹ Mecanismo para la separación de hidrocarburos ligeros en gas de refinería, utilizando carbón activado como adsorbente y vapor de agua para la regeneración.

4.2.1. TIPO DE ADSORBENTES

TIPOS DE ADSORBENTES	
Existen una gran variedad de sólidos con propiedades adsorbentes. Algunos de estos sólidos y su uso industrial para la purificación y control del aire contaminado son los siguientes:	
Carbón activado	Recuperación de solventes eliminación de olores, purificación de gases
Alúmina	Deshidratación de gases
Bauxita	Deshidratación de gases y líquidos
Gel de sílice	Deshidratación y purificación de gases

Los adsorbentes granulares son usados en columnas de relleno.

FUENTE: Straub, Conrad C., M.C.E., Ph. O., "Practical Handbook of environmental control", Editorial CRC Press, Inc. 2da., 1990, USA.

TABLA 4.2.2

APARATOS DE CONTROL PARA EL AIRE CONTAMINADO POR GASES			
TIPO	PRINCIPIO DE OPERACIÓN	EJEMPLOS DE CONTAMINANTES CONTROLADOS	OBSERVACIONES
Adsorción	Condensación sobre la superficie de un sólido	Vapores de solventes orgánicos y malos olores	Adsorbentes gel de sílice, alumina activada, carbón activado

FUENTE: Straub, Conrad C., M.C.E., Ph. D., "Practical Handbook of environmental control", Editorial CRC Press, Inc. 2da., 1990, USA.

4. ASPECTOS TEORICOS

Como en muchas operaciones de ingeniería química, se necesitan los datos cinéticos y de equilibrio para caracterizar el diseño de una unidad de adsorción. Puesto que la mayoría de las operaciones de adsorción son dinámicas, los datos de equilibrio para adsorbentes se utilizan principalmente para calcular la capacidad absoluta de cierto adsorbente para determinado adsorbato. Estos datos sirven entonces para una evaluación preliminar del sistema propuesto.

A menudo se hallan fácilmente los datos de equilibrio de adsorción en la bibliografía específica o entre los datos que facilita el fabricante, cuando éste no es el caso los equilibrios de adsorción se pueden medir sin grandes dificultades. Los datos de equilibrio se expresan en forma de una de las muchas isoterms teóricas que se han propuesto, estas isoterms relacionan las cantidades de adsorbato en el

adsorbente con la concentración de adsorbato en la fase fluida para una temperatura dada.

Se han estudiado a fondo los equilibrios físicos de la adsorción de gas sobre diversos adsorbentes, la distribución de equilibrio de las moléculas de adsorbato entre la superficie del adsorbente y la fase gaseosa depende de la presión, temperatura, naturaleza y superficie del adsorbente, y del tipo de adsorbato.

El material adsorbente puede ser removido por la reducción de la presión o por el incremento de la temperatura, así el proceso es reversible, por lo que el gas condensa sobre la superficie del sólido, acompañado por una evolución de calor (adsorción física). En quimiadsorción, el cual es el resultado de una interacción química entre el sólido y el material absorbido, es usualmente irreversible con el calor de adsorción que es mucho más alto que el de adsorción física. Las moléculas son detenidas en la superficie sólida químicamente y el material original experimenta cambios químicos. La quimiadsorción tiene una importancia particular en catálisis pero no es un mecanismo primario en métodos de control de la contaminación del aire.

Las técnicas de adsorción son muy usadas en el campo de control de olores cuando se remueven pequeñas cantidades de contaminantes presentes en un gran volumen de aire. Estas técnicas (de adsorción) son también usada para coleccionar valiosas sustancias orgánicas que no pueden ser extraídas por métodos de depuración. El grado de adsorción de una sustancia depende de la concentración del material alrededor del adsorbente, de la superficie de área del adsorbente, del volumen del poro del adsorbente, y de algunas otras propiedades, tales como la temperatura, polaridad molecular y de naturaleza química de la superficie del

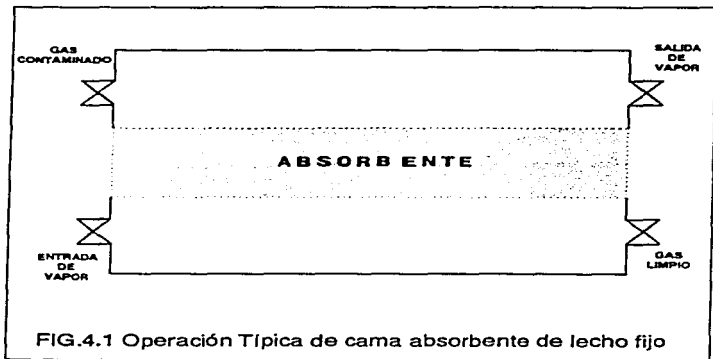
adsorbente. Varios sólidos contienen propiedades de adsorción con grandes superficies de área. Algunos de estos adsorbentes comúnmente usados en el control de aire contaminado son: (como ya se menciono anteriormente), carbón activado, alumina activada, gel de sílice y tamices moleculares. (tabla 4.3)

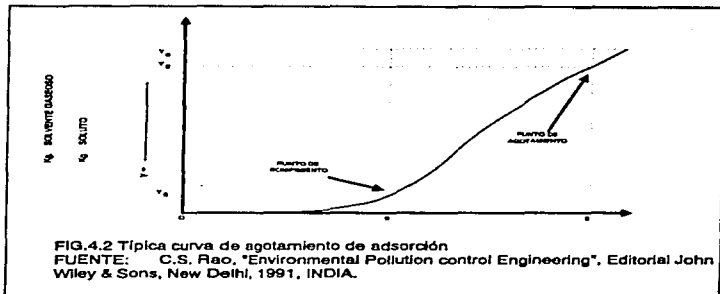
La adsorción de un gas sobre un sólido ocurre en varias etapas. La primera etapa es la difusión del contaminante en fase gaseosa hacia la superficie externa del adsorbente (del sólido), y esto es similar a la difusión del gas en la interfase gas-líquido en absorción. La segunda etapa es la difusión de las moléculas de gas dentro de los poros del sólido, y la tercera etapa es la adsorción actual sobre un lugar activo dentro de los poros del sólido. La tercer etapa es relativamente rápida comparada con las primeras dos etapas, y todas estas etapas anteriores determinan el grado de adsorción. Usualmente no es posible determinar cual de las primeras dos etapas controla el grado de adsorción. En algunos casos esto es de igual significancia.

La separación de contaminantes por adsorción pueden ser transportados fuera en etapas o de una manera de operación continua. La Fig. 4.1 muestra una operación típica de cama (adsorbente) fija de un sólo ciclo. El vapor de gas contaminado sobre la parte alta de la cama, viaja hacia abajo a través del adsorbente y sale por el fondo del adsorbedor.

Cuando el gas entra primero por la cama sólida, la parte principal de la cama adsorbe el gas contaminante muy rápidamente y la pequeña cantidad de soluto es absorbido por capas muy profundas de la cama. Así el gas inicialmente salido de la cama es completamente más libre de contaminantes. Después de un período de tiempo, las capas del sólido se saturan con el gas absorbido y la zona activa de

absorción se mueve al fondo de la cama. finalmente la principal zona activa alcanza el fondo de la cama, por lo que la cama se inactiva y el contaminante sale con el vapor de salida hacia arriba y continua hacia arriba hasta que se acerca al influente de concentración. La curva de la concentración del contaminante como una función del tiempo, tiene una apariencia en forma de ese (S), y es comúnmente llamada curva de rompimiento. La Fig. 4.2 muestra una curva típica de rompimiento.





En el tiempo en el cual la curva de rompimiento alcanza una altura apreciable es llamado punto de agotamiento, y el tiempo en el cual el chorro de salida esencialmente de concentración que alcanza la concentración del contaminante a la entrada, es llamado punto de agotamiento.

El adsorbedor es normalmente regenerado cuando el punto de rompimiento es alcanzado, principalmente la regeneración remueve el contaminante al adsorbente, por eso el adsorbedor esta listo para otro uso. Para el adsorbedor de cama sencilla, como se mostró en la FIG. 4.1 la regeneración esta acompañada por el detenimiento del vapor de gas y el cual permite que el vapor o un gas inerte fluya a través de la cama adsorbente.

5. CINÉTICA DE LA ADSORCIÓN

La cinética global del sistema de adsorción utilizado depende del tipo de método de contacto gas-sólido y de los procesos de transporte del adsorbente desde el seno del gas hasta las superficies internas del adsorbente. Los siguientes procesos de transporte pueden afectar la velocidad global del proceso de adsorción y se han de tener presentes.

- 1) Transferencia del adsorbato desde el seno de la corriente gaseosa hasta la superficie externa del adsorbente (transferencia de masa externa, difusión de la película o transferencia de masa, difusión dentro de la película). Este efecto es análogo a la resistencia de la película gaseosa en la absorción de gases.
 - 2) Transferencia del material desde la superficie externa de la partícula hasta la superficie interna de la partícula porosa por algún mecanismo de difusión (difusión dentro de la partícula).
 - 3) Cinética de la adsorción superficial, por la que el adsorbato se transfiere desde la fase gaseosa hasta la fase adsorbida. La velocidad de adsorción puede variar desde muy rápida (como en la mayoría de los casos de adsorción física), hasta muy lenta (como puede ocurrir en algunos casos de quimiadsorción, en que se necesita un considerable reajuste molecular en la superficie del adsorbente). El proceso de adsorción va acompañado normalmente de desprendimiento de calor.
 - 4) Transmisión del calor generado desde el interior de la partícula hasta la superficie externa de la partícula por un proceso de conducción a través del
-

sólido y del gas (conducción dentro de la partícula).

- 5) Transmisión de calor desde la superficie externa de la partícula hasta el seno de la corriente gaseosa por transporte a través de la película gaseosa externa (transmisión de calor externa).
- 6) Transmisión de calor desde el seno de la corriente gaseosa a la pared del recipiente.

Si todas las velocidades de transmisión de calor son muy grandes, entonces el lecho actúa como un adsorbedor isoterma (está condición se cumple en muchos experimentos de laboratorio). Sin embargo, si la velocidad de transmisión de calor desde el seno de la corriente gaseosa hasta la pared del adsorbedor es nula, entonces el lecho actúa como un adsorbedor adiabático (como en muchos adsorbedores grandes industriales). En general, todas estas etapas tienen velocidades marcadamente diferentes y la velocidad global de adsorción depende de las velocidades de las etapas más lentas. Estas etapas se denominan normalmente como etapas controlantes de la velocidad.

Las etapas (1), (2), (3), (4), (5) y (6) son consecutivas y las etapas (2), (3) y (4) ocurren en paralelo.

6. TECNICAS DE UNIDADES DE ADSORCION

Los procesos que retienen solutos en sólidos por diferentes medios, están muy relacionados con la adsorción. Uno de dichos procesos es el de intercambio iónico,

donde el soluto se retiene por el efecto de una reacción química con la resina sólida de intercambio iónico. Como el nombre lo dice, los iones que se encuentran en una solución pueden eliminarse mediante este proceso, el cual se utiliza mucho para producir agua de gran pureza.

La formación de clatratos es un fenómeno físico que se aplica para separar mezclas con base en su forma molecular. El clatrato sólido atrae y retiene a las moléculas que tienen una forma molecular determinada. Por ejemplo, por medio de un proceso industrial se separa paraxileno de metaxileno, mediante un compuesto clatrático que atrapa al primero. Estos dos compuestos tienen propiedades físicas y químicas muy parecidas, por lo que no pueden emplearse técnicas de separación convencionales. El compuesto clatrático puede considerarse como un tipo particular de adsorbente.

Las resinas de intercambio iónico, las mallas moleculares y los compuestos clatráticos son relativamente costosos si se les compara con adsorbentes de tipo convencional, como son el carbón activado y la sílica gelatinosa. Por ello, estos adsorbentes especiales se emplean en separaciones que no pueden realizarse por métodos convencionales. Estas separaciones especiales se llevan a cabo en proceso intermitentes con adsorbentes de lecho fijo en lugar de utilizar equipo de etapas múltiples o de contacto continuo.

En la tabla 4.3 se indican las diferentes técnicas utilizadas para poner en contacto fluidos y sólidos.

TABLA 4.3

CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE ADSORCION			
TECNICA UTILIZADA	FLUIDO	METODO DE OPERACION	EJEMPLO
Contacto por etapas	Líquidos	Carga y continuo	Filtración de contacto
Contacto continuo 1. Estado estacionario a) Lecho móvil b) Lecho fluidificado c) Lecho descendente	Gases y Líquidos	Continuo	Hipersorción, proceso Landmark para el CS_2 , proceso Reinluft para el SO_2
2. Estado no estacionario. Lecho fijo		Semicontinuo	Recuperación de disolventes, secado de gases

FUENTE: Parker Albert, "Contaminación del aire por la Industria", Editorial Riverté, S.A., 1983, ESPAÑA.

6.1 CONTACTO POR ETAPAS

En la práctica industrial, las operaciones por etapas se limitan al tratamiento de soluciones líquidas diluidas.

6.2 CONTACTO CONTINUO

En estas operaciones, el fluido y el adsorbente están en contacto continuo sin separación periódica de las fases. El proceso puede realizarse en condiciones de estado estacionario estrictamente continuo, caracterizado por el movimiento del

sólido. O bien, debido a la rigidez de las partículas sólidas adsorbentes, es con frecuencia ventajoso trabajar de manera semi-continua, que se distingue por un fluido móvil y un lecho estacionario (lecho fijo). Esto conduce a unas condiciones de estado no estacionario, con el resultado de que el análisis teórico de dichas unidades es complejo.

6.2.1 LECHOS MOVILES

Los lechos en que los sólidos se mueven en flujo de pistón con respecto al recipiente que los contiene se diseñan para trabajar en estado estacionario, y por tanto, el análisis teórico de su diseño es más sencillo que el de los lechos fijos. En estas condiciones, cabe considerar los lechos móviles en función de unidades de transferencia y entonces se procede al análisis matemático de manera similar a la utilizada para los absorbedores.

6.2.2 LECHOS FLUIDIFICADOS

El complejo comportamiento del fluido y del sólido en un lecho fluidificado es un tratamiento riguroso de la adsorción continua, pero es altamente ventajoso utilizar etapas múltiples, y para estas condiciones, los cálculos se realizan exactamente como en el caso de la absorción en torres de platos, siempre y cuando exista un equilibrio de materias, cuando no se puede suponer equilibrio han esquemizado un método de diseño utilizando un modelo de lecho de burbujas. La composición media en la fase gaseosa se calcula a partir de las velocidades de transferencia medidas por el modelo de lecho de burbujas y de un hipotético modelo

de cinética gaseosa.

Se ha encontrado una solución suponiendo una reacción de primer orden pero incluidos los efectos de burbujeo en el lecho fluidificado para sólidos completamente mezclados y para flujo pistón. Estas soluciones son realmente para reacciones catalíticas de primer orden, pero son aplicables al problema de adsorción siempre que la velocidad de adsorción a una partícula única pueda expresarse por una ecuación de velocidad de pseudo-primer orden. El lecho fluidificado se ha utilizado con éxito en el proceso de Landmark.

6.2.3 "NUBE" DESCENDENTE

En el proceso de "nube" descendente en que una nube de partículas cae a través de una corriente ascendente de gas, las partículas son completamente independientes, y puede considerarse como un lecho móvil de fase dispersa.

6.3 ESTADO NO ESTACIONARIO

6.3.1 LECHOS FIJOS

Comprender los procesos que ocurren en un lecho fijo es fundamental para el diseño de cualquier equipo de adsorción. Se ha concedido a este problema creciente atención, pero las soluciones desarrolladas no sirven para describir con precisión el comportamiento de grandes lechos. Sin embargo, los lechos fijos son el

tipo más ampliamente utilizado de equipo de adsorción debido a su simplicidad de operación.

Es posible separar una mezcla de varios solutos adsorbibles utilizando un lecho fijo de adsorbente. Primero se alimenta un pequeño volumen de la mezcla al lecho que se adsorbe por completo cerca de la entrada. Entonces, se pasa un flujo continuo de disolvente a través del lecho. Parte de la mezcla se desadsorbe y avanza con el disolvente. La velocidad a la cual avanza cada soluto sobre el lecho, depende de su adsorción de equilibrio en el sólido. Si el adsorbente retiene fuertemente a un componente, éste pasará con lentitud a través del lecho, mientras que un componente que se adsorbe poco, avanzará con mayor rapidez. Como resultado los componentes saldrán del lecho en tiempos diferentes y podrán separarse. Este proceso de separación recibe el nombre de cromatografía. La separación por cromatografía es un método de análisis químico para muestras pequeñas, el cual tiene pocas aplicaciones a gran escala.

7. REGENERACION DE LOS ADSORBENTES

La regeneración de los adsorbentes es una de las operaciones más importantes en la adsorción. Puesto que la energía libre del sistema disminuye durante la adsorción, se ha de suministrar energía al adsorbente saturado para desprender el adsorbato. La parte principal del coste de funcionamiento de cualquier proceso de adsorción reside en esta etapa de regeneración. Deben encontrarse las condiciones óptimas de regeneración para obtener las mayores eficacia y vida del adsorbente con una entrada mínima de energía durante la regeneración. Existen varios ciclos básicos de regeneración-adsorción que se examinan a continuación.

- 7.1. Ciclo de oscilación térmica
- 7.2. Ciclo de oscilación de presión
- 7.3. Ciclo de desorción de un gas de purga
- 7.4. Ciclos de desplazamiento
- 7.5. Ciclos de combinación

7.1 CICLOS DE OSCILACION TERMICA

Este ciclo es el más corrientemente usado y se define ampliamente como cualquier ciclo que emplee diferentes márgenes de temperatura para la adsorción y la desorción ($T_{des} > T_{ads}$). La calefacción para la regeneración puede ser directa o indirecta. Si se usa calefacción indirecta, el serpentín de calefacción sirve también como serpentín de refrigeración después de la regeneración y durante la adsorción. La principal característica de este ciclo consiste en la posibilidad de obtener elevadas capacidades de adsorción.

7.2 CICLO DE OSCILACION DE PRESION

Cabe desarrollar los procesos de adsorción a temperatura constante utilizando más baja presión para la regeneración que para la adsorción. Este ciclo puede ser relativamente sencillo ya que se han eliminado las etapas de calefacción y refrigeración, lo cual facilita cambiar rápidamente el ciclo reduciendo así las dimensiones globales del adsorbedor.

7.3 CICLO DE DESORCION DE UN GAS DE PURGA

Purgando un adsorbente con un gas inerte se reduce la presión parcial del adsorbato en la fase vapor, y esto causa la desorción. El gas de purga puede ser condensable, lo que reduce enormemente las necesidades de bombeo y simplifica la separación del gas de purga y el adsorbato después de la desorción.

7.4 CICLOS DE DESPLAZAMIENTO

Los ciclos de desplazamiento, en que se usa un adsorbato más fuertemente adsorbible para desplazar el adsorbato original, se utilizan algunas veces cuando el adsorbato original se descompone fácilmente.

7.5 CICLOS DE COMBINACION

El uso de vapor de agua de proceso es una de las formas más corrientes de regeneración, ya que el vapor de agua actúa creando un ciclo de oscilación térmica, gas de purga y desplazamiento a la vez. El vapor de agua es, además, fácilmente condensable y está disponible en grandes cantidades.

Normalmente en las unidades de adsorción de lecho fijo se utiliza el sistema de dos lechos donde uno se está regenerando mientras el otro está adsorbiendo, aunque si el ciclo de regeneración es largo quizá un sistema de tres lechos.

CAPITULO QUINTO

VENTILACION INDUSTRIAL

1. INTRODUCCION

En este capítulo se hace una recopilación de los artículos mas importantes que se han publicado y se presentan los procedimientos para el diseño de campanas de extracción y ductos de ventilación. También se incluye un método sencillo para el cálculo de chimeneas.

Fuentes de contaminación. Las fuentes de contaminación del aire se pueden clasificar en cuatro grupos principales que son: industria, plantas de generación de energía, agricultura y transporte.

La industria debe considerarse en primer término no porque produce la mayor parte de contaminación, sino porque es la fuente de contaminación más notoria. Para controlar la contaminación industrial se pueden hacer cambios a las condiciones de proceso o al flujo de materiales, dichos cambios pueden eliminar por completo la contaminación, o hacen que la recolección o dispersión de contaminantes sea más fácil. en algunas ocasiones se observa que los cambios al proceso no son factibles desde el punto de vista técnico y/o económico, esto no significa que no se considere como una parte de la solución.

Otra forma de control es la dispersión, pero sólo se aplica cuando se requiere reducir la concentración del contaminante a los niveles permitidos por la ley. Cuando se necesita ventilar algún lugar dentro de la planta industrial mediante esta técnica, lo más apropiado es inyectar una cantidad de aire fresco de tal forma que

la concentración del contaminante se diluya hasta el punto deseado. Si una planta industrial está descargando a la atmósfera algún material contaminante y se quiere controlar el problema mediante dispersión, una chimenea elevada sirve para tal fin. Pero las chimeneas sólo sirven para distribuir el contaminante en una área mayor.

Si la ventilación por dispersión o los cambios al proceso no sirven para controlar las emisiones, se debe instalar un sistema que capture a los materiales contaminantes, después de ser generados y antes de que los gases sean descargados a la atmósfera. Estos sistemas constituyen el corazón de la tecnología para el control de la contaminación del aire. Todo sistema de ventilación esta compuesto de cuatro partes o equipos básicos:

- 1) Campana de extracción, que son las encargadas de capturar todo tipo de emisión; una vez capturadas las emisiones se transportan a través de:
- 2) Ductos diseñados para tal fin;
- 3) Abanicos, son los encargados de proporcionar el gradiente de presión necesario para el transporte del fluido y los contaminantes; y por último se encuentran los
- 4) Equipos de filtración para recuperar o eliminar las emisiones contaminantes. Además, se instala una
- 5) Chimenea al final de todo sistema de ventilación industrial para dispersión a la atmósfera las partículas que no alcanzaron a filtrarse.

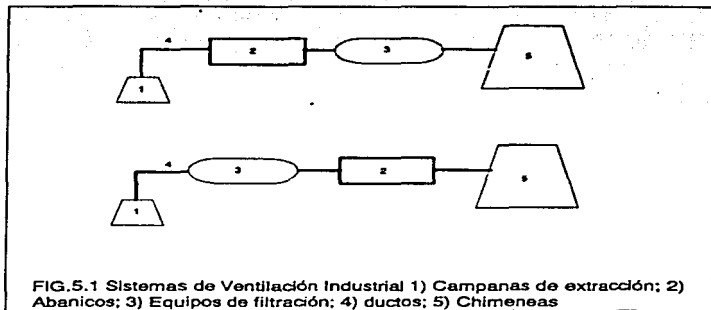
o bien para proporcionar una cantidad extra de fuerza de succión o tiro³².

Los equipos de un sistema de ventilación pueden ser instalados en dos arreglos diferentes, tal como lo muestra la Fig.-5.1

Para diseñar o evaluar cada uno de los equipos de un sistema de ventilación industrial existe la tecnología apropiada, pero se encuentra ampliamente diseminada³³, por lo que se hace una recopilación de la bibliografía existente, con el objeto de presentar en forma clara y ordenada la forma como se diseña, se selecciona o se evalúa cualquier sistema de ventilación industrial para control de contaminación.

³² Corriente de aire que sostiene la combustión.

³³ Mucha de esta tecnología se encuentra dispersa en diferentes procesos, de los cuales no todos tienen tecnología requerida en todos sus equipos.



2. CONCEPTOS BASICOS

Para diseñar o seleccionar los componentes de un sistema de ventilación industrial es necesario recordar ciertos principios básicos de mecánica de fluidos. El fluido puede ser aire o una mezcla de aire y contaminantes que pueden ser particular sólidas, gases u olores.

El primer concepto básico a mencionar es acerca de las condiciones estándar de presión y temperatura. En ventilación industrial se considera aire a condiciones estándar, aquel que tienen una densidad de 0.075 lb/ft^3 , equivalente a aire seco a una

presión barométrica³⁴ de 29.92 in (760 mm) de Hg y a una temperatura de bulbo seco de 70°F (20.2°C (ACGIH)³⁵). También es conveniente mencionar que el aire como cualquier otro gas es comprensible. Pero dado que la diferencia de presiones en un sistema de extracción es generalmente menor de 12 pulgadas de agua, la presión total del sistema se toma como una constante. (Alden, John).

La presencia de polvillo en una corriente gaseosa puede despreciarse en el diseño práctico, si la concentración de sólidos es baja. Sólo en aquellos casos en donde la concentración sea mayor de 0.0015 lb/ft³ de aire o alrededor del 2% en peso, el procedimiento de cálculo implica modificar la densidad de la mezcla. En cambio, si se añade agua para enfriar los gases, o si el peso molecular del gas de un proceso difieren substancialmente del peso del aire, se deberá hacer la corrección correspondiente (Alden John). Bajo estas circunstancias, el flujo de aire en un sistema de ventilación se puede describir por medio de la ecuación de bernoulli (Brodkey R., Hershey H.).

3. CAMPANAS DE EXTRACCION

Las campanas de extracción son los principales elementos de un sistema de ventilación industrial y se utilizan para capturar las emisiones de materiales contaminantes. Los cuales una vez capturados por las campanas se transportan a través de los ductos para su recuperación y/o descarga a la atmósfera. Las campanas

³⁴ Es la fuerza que ejerce la atmósfera sobre los cuerpos y se mide con el barómetro. Varía con el lugar, la altura, la temperatura y los fenómenos meteorológicos.

³⁵ American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

se deben colocar en los puntos más adecuados del proceso para ventilar con el menor volumen de aire posible; se debe buscar cerrar los puntos de emisión sin que se interfiera en la operación o mantenimiento de los equipos. Las campanas de extracción se clasifican en cuatro tipos básicos tal como lo muestra la fig. 5.2.

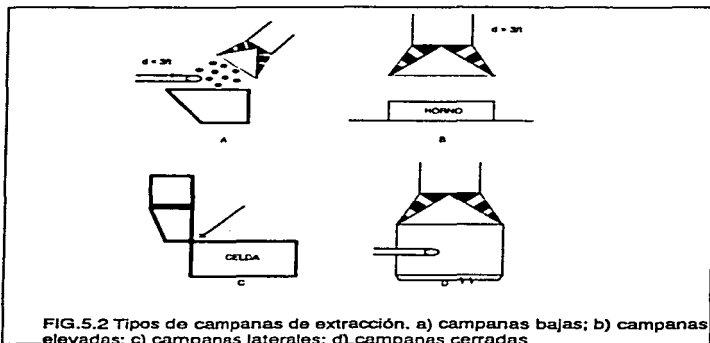


FIG.5.2 Tipos de campanas de extracción. a) campanas bajas; b) campanas elevadas; c) campanas laterales; d) campanas cerradas

3.1 CAMPANAS BAJAS

Son pequeñas estructuras colocadas muy cerca de la fuente contaminante, la distancia entre la campana y la fuente no excede un diámetro de dicha fuente o no

llega a 3 ft. Las campanas bajas son capaces de atrapar a las partículas antes de que se dispersen hacia las áreas adyacentes. Se usan para controlar las emisiones de las herramientas de corte o pulido de metales, y en los puntos de transferencia de las bandas transportadoras.

3.2 CAMPANAS ELEVADAS

Son elementos capaces de manejar grandes volúmenes de aire y se colocan en la parte superior de un equipo. Estas campanas se usan en los hornos de fusión de metales y en la boca de descarga de los hornos de sople. En este tipo de operaciones se transfiere una gran cantidad de calor hacia el medio ambiente, lo que provoca que se forme una corriente ascendente de aire caliente con velocidades hasta de 400 ft/min y que se extrae junto con las emisiones. Las campanas bajas no son adecuadas para los procesos pirometalúrgicos porque se deberían construir de material refractario³⁶.

3.3 CAMPANAS LATERALES

Se instalan a un lado del equipo a ventilar para no interferir con la operación, para que los operadores no entren en contacto con el aire contaminado. También deben ser capaces de manejar grandes volúmenes de aire. Estas campanas se usan en las pilas electrolíticas y en los baños de pintura.

³⁶ Es el material que resiste sin fundirse a una temperatura elevada.

3.4 CAMPANAS CERRADAS

Son las campanas con diseño más efectivo, por que un punto productor de contaminantes se aísla del área de trabajo y porque para la remoción de partículas utilizan un volumen mínimo de aire. Para prevenir el escape de contaminantes basta con permitir la filtración de aire a través de las puestas de inspección o por las ranuras diseñadas para tal fin, se usan en casi todas las operaciones, o al menos eso debe intentarse al diseñar un sistema de ventilación industrial.

4. DISEÑO DE CAMPANAS

Para diseñar correctamente las campanas de extracción es necesario conocer o determinar la velocidad del aire capaz de capturar las partículas contaminantes y la velocidad mínima requerida para transportarlas a lo largo de los ductos. Existe un procedimiento de cálculo comprobado para dimensionar correctamente las campanas elevadas y bajas usadas en los procesos de elevadas temperaturas. Para dimensionar las campanas de otro tipo o para operaciones específicas se recurre a los estándares de ventilación publicados a la fecha (ACGIH). Posteriormente se evalúan las pérdidas de presión en la campana, estos datos son de elevada importancia porque nos ayudan a determinar el tamaño de un ventilador y evaluar los gastos de energía.

4.1 VELOCIDAD DE CAPTURA

La velocidad de captura se define como la velocidad mínima con la que un contaminante o emisión puede ser atrapado. La velocidad debe ser de magnitud suficiente para también transportar a los contaminantes a la zona de alta velocidad

en la boca de la campana. Algunos datos típicos de velocidades de captura se presentan en la tabla 6.1. (Alden, John).

TABLA 5.1

VELOCIDADES DE CAPTURA PARA ALGUNOS CONTAMINANTES		
CONDICION DE GENERACION DEL CONTAMINANTE	EJEMPLO	VELOCIDAD ft/min
Libremente a baja velocidad en aire estático	Evaporación en tanques	50 - 100
Libremente a baja velocidad 100 - 200	Llenado de tanques	
En aire a baja velocidad	Transportadores de baja velocidad	
A alta velocidad en aire en movimiento	Pintura a spray, molinos y transportadores	200 - 500
A alta velocidad en aire a altas velocidades	Pulido normal o a chorro de arena	500 - 2000

FUENTE: Alden John, "Design of Industrial Ventilation Systems", 5th Edition, Industrial Press Inc. 1982, USA.

4.2 VELOCIDAD DE TRANSPORTE

Es la velocidad mínima de transporte de las partículas en los ductos para evitar el asentamiento de los sólidos y posterior taponamiento de los ductos. La velocidad

debe ser constante en todos los ramales del sistema de ventilación. Para lograr esto, los puntos donde se unen dos ramales al ducto resultante deberán tener un diámetro tal que permita conservar la velocidad de transporte seleccionada. La tabla 6.2 presenta los rangos de velocidad de transporte para algunos contaminantes. Los cuales han sido determinados experimentalmente.

TABLA 5.2.

VELOCIDAD DE TRANSPORTE PARA ALGUNOS CONTAMINANTES	
NATURALEZA DEL CONTAMINANTE	VELOCIDAD ft/min
Vapores, Gases y Humos	1000 - 2000
Sólidos condensados	1400 - 2000
Polvos muy finos	2000 - 2500
Polvillos secos	2500 - 3000
Polvillos pesados	3500 - 4000
Polvos pesados	4000 - 4500
Polvos húmedos	4500 Y MAYORES

FUENTES: Alden John, "Design of Industrial Ventilation Systems" 5th, Edition, Industrial Press Inc. 1982, USA.

4.3 PERFILES DE VELOCIDAD

El aire enfrente de las campanas se mueve libremente hacia la abertura por el efecto de succión. La velocidad en el eje de las líneas de contorno dependen del área de la abertura y de la distancia desde la cara de la campana hasta el punto de medición. En términos generales para una campana circular o rectangular sin cejas

la velocidad se expresa como:

$$V = \frac{Q_r}{10x^2 + A} \quad (1)$$

Para otro tipo de campanas existe una serie de ecuaciones experimentales para evaluar la relación entre el flujo, la velocidad y la distancia enfrente de la campana tabla 6.3.

TABLA 5.3.

FORMULAS PARA CALCULAR LA VELOCIDAD ENFRENTA DE UNA CAMPANA		
TIPO DE CAMPANA	ANCHO / LARGO	VOLUMEN ft/min
Ranuras rectangulares	0.2 menor	Q=3.7 LVX
Ranuras rectangulares con cejas	0.2. menor	Q=2.8 LVX
Circular o rectangular con cejas	0.2 ó mayor	Q=0.75 V (10X2+A)
Elevada		Q=1.4 PDV

FUENTE: Sutton, O.G., "The Dispersion of Hot Gases in the Atmosphere", Journal of Meteorology, Vol. 7, oct-1950

4.4 DIMENSIONES DE LAS CAMPANAS ELEVADAS

Las campanas elevadas se diseñan en base al concepto de ascensión del aire caliente. El cual forma una pirámide invertida como se muestra en la Fig. 5.3.

Sutton, O. G. desarrollo una serie de ecuaciones empíricas para el cálculo de velocidades y diámetro del cono de aire caliente a cualquier altura de una fuente hipotética localizada a una distancia Z por debajo de la fuente real.

$$D_c = 0.5 X_f^{0.88} \quad (2)$$

$$X_f = Y + Z \quad (3)$$

$$Z = 1.7048 D_f^{1.323} \quad (4)$$

$$V_f = \frac{8.0196 A_s (\Delta T)^{3/2}}{X_f^{1/4}} \quad (5)$$

Por razones de seguridad las campanas se fabrican un poco más grandes. Por lo que el diámetro de la campana y el flujo se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$D_f = D_c + 0.8 Y \quad (6)$$

$$Q_T = V_f A_c + V_f (A_f - A_c) \quad (7)$$

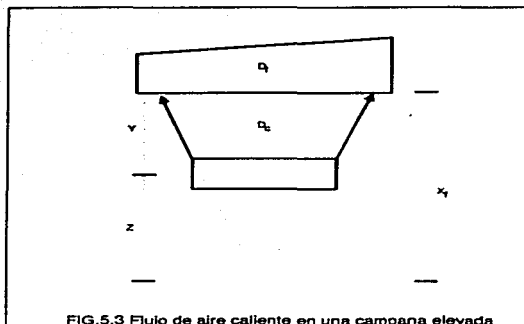


FIG.5.3 Flujo de aire caliente en una campana elevada

4.5 DIMENSIONES DE LAS CAMPANAS BAJAS

Cuando una campana está colocada muy cerca del punto de emisión prácticamente no hay mezcla de aire caliente con aire frío. Las campanas se dimensionan con un diámetro igual al de la fuente caliente más una longitud extra de 1 (ft) por concepto de seguridad. En el caso de campanas rectangulares se suma un pie de longitud a cada lado de la fuente caliente. Los flujos volumétricos para una campana circular o rectangular se calculan por medio de las ecuaciones (8) y (9)

respectivamente.

$$Q_T = 4.774 D_i^{2.33} \Delta T^{3/12} \quad (8)$$

$$Q_T = [6.407 D_i^{4/3} (\Delta T)^{3/12}] D_{Tz} \quad (9)$$

4.6 PERDIDAS DE PRESION

En una campana simple la presión dinámica³⁷ a la entrada representa la presión requerida para acelerar el aire en reposo hacia el ducto, mientras que (h_{ed}) representa la energía necesaria para vencer las pérdidas originadas a la entrada. La suma de ambas es igual a la presión estática³⁸ en la campana.

$$SP_s = VP_d + h_{ed} \quad (10)$$

³⁷ Es la fuerza que se ejerce en cuerpos en movimiento, que se puede dividir en cinética (relación del movimiento con las fuerzas que lo producen), y cinemática (análisis del movimiento mismo); sus principios y métodos son aplicables a todos los problemas de movimiento.

³⁸ Es la fuerza que se ejerce en cuerpos en equilibrio o en estado de movimiento uniforme.

En la práctica, las pérdidas a la entrada de la campana se expresan como una fracción de la presión dinámica, esto es:

$$h_{ed} = (F_h) (VP_d) \quad (11)$$

La magnitud del factor de corrección (F_h) depende de la forma de abertura de succión. Una campana que no cause mucha turbulencia tendrá un factor (F_h) muy pequeño, por el contrario, una campana en donde se forme una vena contracta muy pronunciada tendrá un factor (F_h) de valor elevado, Tabla 6.5. Las pérdidas de presión se pueden evaluar por medio del "coeficiente de entrada" definido como la relación entre el flujo real de una campana y el flujo teórico resultante de una conversión total de la presión estática a presión dinámica, o sea, cuando $F_h = 0$.

$$C_e = \frac{Q_{real}}{Q_{máx}} \frac{\sqrt{VP_d}}{\sqrt{SP_n}} \quad (12)$$

La relación entre C_e y F_h esta dada como:

$$F_h = \frac{(1 - C_e^2)}{C_e^2} \quad (13)$$

5. DUCTOS Y ACCESORIOS

El flujo de aire de un ducto siempre encuentra una resistencia debida a la fricción o a las turbulencias. La energía necesaria para vencer las resistencias puede expresarse como una caída de presión, por que ellas representan una cantidad extra de presión estática generada en el ventilador. Las pérdidas de presión por cada 100 ft de tubería se calculan por medio de la ecuación modificada de Darcy (ACGIH, Alden, John).

$$h_f = 7.5 \times 10^{-5} \frac{fV^2}{D_d} \quad (14)$$

Las pérdidas por fricción también pueden expresarse en términos de la presión dinámica.

$$h_f' = \frac{h_f}{VP} \quad (15)$$

Las pérdidas por fricción se pueden calcular por medio de las gráficas (ACGIH) que relacionan: flujo volumétrico, velocidad, diámetro del ducto y pérdidas por fricción en 100 ft de tubería. Para fines computacionales se puede usar la siguiente ecuación:

$$h_f = \frac{2.74 [V/1000]^{1.9}}{D_d^{3.22}} \quad (16)$$

Se debe mencionar que sólo se hacen correcciones por temperatura cuando se opera el sistema de ventilación fuera del rango de 32-100 °F. Si se usan ductos de sección transversal no circular se debe usar el radio hidráulico en lugar del diámetro.

5.1 PERDIDAS EN LOS CODOS

Cuando una corriente de aire cambia de dirección y de velocidad en un codo hay pérdidas de presión apreciable. La magnitud de ellas depende del radio de curvatura, del ángulo de giro y de la velocidad de aproximación. Las pérdidas de presión en codos de 90° con radios de giro mayor a 1.5 se pueden calcular por medio de la siguiente expresión (ACGIH).

$$L_e = [0.74 RR^2 - 3.982 RR + 6.805] D_d - 3.0 \quad (17)$$

$$h_f = 1.414 - 0.957 RR + 0.194 RR^2 \quad (18)$$

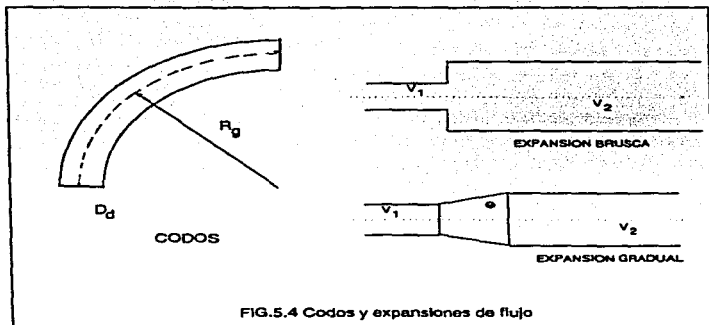


FIG.5.4 Codos y expansiones de flujo

Cuando el ángulo de giro es diferente de 90° , las pérdidas se evalúan multiplicando los resultados de las fórmulas anteriores por un factor calculado con la siguiente expresión:

$$F_c = \frac{\text{Angulo del Codo}}{90} \quad (19)$$

5.2 PERDIDAS EN LAS EXPANSIONES Y EN LAS CONTRACCIONES

Si el aumento en el área de flujo en una tubería se hace suavemente se permite la libre conversión de energía cinética³⁹ a energía potencial⁴⁰. La disminución de la presión de velocidad en una expansión se compensa parcialmente con un aumento en la presión estática. Las pérdidas en una expansión es la cantidad de energía que no logra transformarse totalmente y se puede manejar matemáticamente como una función de la diferencia entre las presiones dinámicas antes y después de la expansión.

$$VP_1 = VP_2 + h_f/k \quad (20)$$

$$hf = k \left[\left(\frac{V_1}{4005} \right)^2 - \left(\frac{V_2}{4005} \right)^2 \right] \quad (21)$$

En una expansión brusca con un ángulo de transición mayor o igual a 60°, se tiene un máximo en las pérdidas de presión y el factor toma el valor de 1.0. Cuando el ángulo de transición es menor de 60° el valor del factor k es menor de

³⁹ Es la energía que tiene un cuerpo en virtud de su movimiento, si la masa del cuerpo es m y su velocidad en v , su energía cinética es: energía cinética = $\frac{1}{2} m v^2$.

⁴⁰ Es la energía que tiene un cuerpo en virtud de su posición. Un libro sostenido a una determinada altura sobre el piso, tiene una energía potencial gravitacional debido a que puede realizar trabajo sobre otro cuerpo cuando cae. La energía potencial gravitacional de un cuerpo de masa m que se encuentra a una altura h sobre un determinado nivel de referencia es:

Energía potencial gravitacional = $EP = mgh$ donde g es la aceleración terrestre gravedad. En términos del peso w del cuerpo, $EP = wh$.

la unidad y es función únicamente del ángulo de transición (tabla 5.4). Cualquier contracción en el área de flujo también causa pérdidas de energía. En este tipo de accesorios se tiene un factor de pérdidas menor de la unidad, y cuando el ángulo de la transición es menor de 45° las pérdidas de presión son tan pequeñas que pueden despreciarse.

TABLA 5.4

FACTORES DE PERDIDAS DE PRESION EN LAS CONTRACCIONES Y EXPANSIONES			
EXPANSIONES		CONTRACCIONES	
ANGULO	FACTOR k	ANGULO	FACTOR k
7.00	0.22	20.00	0.06
10.00	0.28	30.00	0.08
20.00	0.44	40.00	0.10
30.00	0.58	50.00	0.11
40.00	0.72	60.00	0.13
50.00	0.87	90.00	0.20
60.00	1.00	120.00	0.30

FUENTE: Alden, John, "Design of industrial Ventilation Systems" 5th edition, Industrial Press, Inc., 1982, USA.

5.3 PERDIDAS EN LAS CONEXIONES

En los sistemas de ventilación con dos o más campanas de extracción hay varios ramales de tubería conectados a un ducto principal (Fig. 5.5.). En la conexión de un ramal en otro ducto se producen turbulencias y hay pérdidas de presión. En orden de minimizar dichas pérdidas es recomendable conectar el ramal de la tubería principal por medio de un expansión gradual. El diámetro del ducto resultante al unir dos tubos deberá ser aquel donde se mantenga la velocidad de diseño constante o sea:

$$D_2 = 12 \sqrt{\frac{4}{\pi} \left(\frac{Q_1 + Q_2}{V_d} \right)} \quad (22)$$

Las pérdidas de energía en este tipo de accesorios depende grandemente del ángulo de entrada del ramal en el ducto principal. Las pérdidas de presión se pueden manejar como un longitud equivalente. Las ecuaciones (23) y (24) muestran las pérdidas de presión para conexiones con un ángulo de 30° y 45° respectivamente.

$$L_p = 1.065 D_p - 1.415 \quad (23)$$

$$L_p = 1.701 D_p - 2.605 \quad (24)$$

Las pérdidas de presión dinámica se calculan como:

$$h_e = \exp (0.0330 - 2.605) \quad (25)$$

$$D_2 = 12 \sqrt{\frac{4}{\pi} \left(\frac{Q_1 + Q_2}{V_d} \right)} \quad (22)$$

Las pérdidas de energía en este tipo de accesorios depende grandemente del ángulo de entrada del ramal en el ducto principal. Las pérdidas de presión se pueden manejar como un longitud equivalente. Las ecuaciones (23) y (24) muestran las pérdidas de presión para conexiones con un ángulo de 30° y 45° respectivamente.

$$L_e = 1.065 D_R - 1.415 \quad (23)$$

$$L_e = 1.701 D_R - 2.605 \quad (24)$$

Las pérdidas de presión dinámica se calculan como:

$$h_f = \exp (0.0330 - 2.605) \quad (25)$$

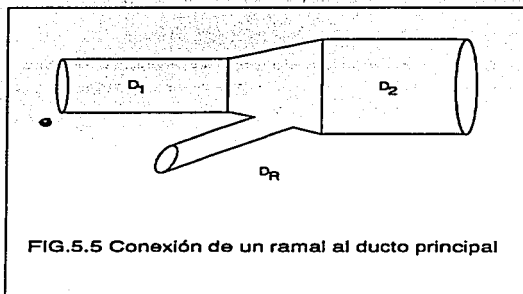


FIG.5.5 Conexión de un ramal al ducto principal

6. CHIMENEAS

Las chimeneas son una parte importante dentro de la ventilación industrial, estos equipos provocan una succión en la parte inferior para mantener bajo tiro inducido a los equipos de filtración si los hay y/o a los equipos de proceso.

En principio de la operación es bastante sencillo. La succión se debe a las fuerzas de ascensión del aire caliente dentro de la chimenea. La medida de ésta es la diferencia del peso de la chimenea de gases calientes y el que tendría si se llenaba de aire a temperatura ambiente.

$$F_A = HS (\rho_c - \rho_l) \quad (26)$$

El tirón calculado de esta forma sin tomar en cuenta las pérdidas se denomina **succión total o cabeza total**, y se puede expresar en unidades de presión (lb/in²), o como altura de una columna en pulgadas de agua.

$$h_c = \frac{F_A}{S} (0.0162) (12) \quad (27)$$

Parte de la fuerza de succión que proporciona una chimenea se desperdicia para vencer la fricción de las paredes, otra parte se utiliza para proporcionar movimiento a los gases que circulan por la chimenea. Sólo una parte de la fuerza total de succión queda disponible para efectuar el tirón en los ductos, hornos o equipos hacia la base de la chimenea.

La energía necesaria para mover el gas dentro de la chimenea depende de la velocidad con que se mueve dicho gas y se calcula con la ecuación:

$$h_v = \frac{V^2}{2g} \frac{\rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{gases}}} \quad (28)$$

Por otro lado, siempre hay pérdidas por fricción en las paredes de la chimenea. Estas se expresan como una función de la succión real, suponiendo que no hay pérdidas. Para ese cálculo se usa la siguiente expresión:

$$h_f = h_v \frac{H}{D} k \quad (29)$$

donde:

k = 0.05 para ductos lisos

k = 0.12 para ductos de alta rugosidad

k = 0.08 promedio

Entonces la cantidad real del tirón depende de las pérdidas por fricción y de la energía necesaria para mover el gas, matemáticamente se puede arreglar en la siguiente forma:

$$h_d = h_c - [h_v + h_f] \quad (30)$$

Los procedimientos de balanceo de los sistemas presentados son dos métodos de cálculo, los cuales se encuentran ejemplificados en el manual de ventilación (ACGIH). También se recomienda el artículo escrito por Lynch, Jeremiah.

7. NOMENCLATURA

- A = Area de la abertura de la campana
 A_c = Area del cono de aire caliente en su base
 C_e = Coeficiente de entrada en una campana
 D_1 = Diámetro antes de la expansión
 D_2 = Diámetro después de la expansión
 D_c = Diámetro del cono caliente en su base
 D_d = Diámetro del tubo
 D_r = Diámetro de la campana
 D_{r1} = Ancho de la campana
 D_{r2} = Longitud de la campana
 f = Factor de fricción de Darcy
 F_A = Fuerza de ascensión
 F_b = Factor de corrección de pérdidas de presión
 H = Altura de la chimenea
 h_{ed} = Pérdidas a la entrada [=] in H_2O
 h_f^1 = Pérdidas de fricción en un ducto recto en función de la presión dinámica
 h_f = Pérdidas de fricción en un ducto recto
 h_p = Pérdidas de presión en una chimenea
 h_s = Succión total en in H_2O
 h_v = Succión de velocidad
 k = Factor de pérdidas
 L_e = Longitud equivalente
 Q_1 = Flujo volumétrico en el ducto principal antes de la conexión [=] ft^3/min
 Q_2 = Flujo volumétrico en el ducto principal después de la conexión [=]

ft^3/min Q = Flujo volumétrico Q_R = Flujo volumétrico en el ramal Q_T = Volumen total a manejar por la campana ft^3/min R_G = Radio de giro del codo [=] in RR = Coeficiente de relación RG/Dd S = Area transversal de la chimenea SP_0 = Presión estática en la campana [=] in H_2O V = Velocidad del aire V_d = Velocidad de diseño o velocidad de transporte VP_d = Presión dinámica en el ducto [=] in H_2O V_f = Velocidad del aire en el espacio libre entre el cono y la campana Y = Distancia de la fuente de emisión a la campana Z = Distancia de la fuente hipotética a la fuente real T = Diferencia de temperatura entre la fuente caliente y el aire ambiental, $^{\circ}F$ ρ = Densidad θ = Angulo de giro o ángulo de la expansión

CAPITULO SEXTO

LEGISLACION AMBIENTAL

1. INTRODUCCION

En las últimas décadas, han ocurrido simultáneamente, una rápida modernización de la economía y un crecimiento acelerado de la población. Durante este período, se consideró que, con la urbanización y la industrialización, mejoraría automáticamente la calidad de vida de la población, sin considerar el impacto que tendrían, tanto la expansión de las nuevas actividades económicas como la concentración de la población en grandes ciudades. Actualmente enfrentamos los desequilibrios provocados por el uso de tecnologías, asociadas con la modernización, y por la concentración poblacional, en forma semejante a lo que ocurre en las sociedades desarrolladas.

Para responder a las nuevas necesidades sociales y al crecimiento poblacional se hizo énfasis en la diversificación de la economía, pero no se atendió, en forma suficiente, la conservación de los recursos naturales y la protección al ambiente, por lo que en los últimos años, tanto en las ciudades como en el campo, se ha cobrado mayor conciencia de los problemas ecológicos y su atención se ha convertido en una de las prioridades de la sociedad.

La solución a los problemas ecológicos no está, desde luego, en sacrificar el desarrollo, menos aún, en una situación como la que enfrenta el país, con tantas

necesidades pendientes de alimentación, empleo y vivienda. La solución está en lograr un mejor equilibrio ecológico, prevenir los impactos adversos a las actividades económicas y aprovechar, en forma racional, los recursos naturales de que disponemos.

Hemos llegado a una situación en la que con frecuencia, la mejor solución ecológica es también la mejor solución económica. Es decir, que resulta más conveniente intercambiar y tratar las aguas residuales que continuar transportando el agua de una cuenca a la otra; que es una mejor solución, perfeccionar los procesos de combustión que pagar los costos adicionales que implica un mayor consumo de combustible, en las industrias. Aunque desde luego, llevar a cabo un número importante de acciones de protección ecológica puede representar un costo adicional para la sociedad, por lo que éstas requieren ser evaluadas dentro del conjunto de las prioridades de nuestro desarrollo.

Tomando el párrafo del artículo 25 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, modificado el 3 de febrero de 1983 en el Diario Oficial de la Federación quedando como sigue:

ARTICULO 25.-.....

.....
Bajo criterios de equidad social y productividad se apoyará e impulsará a las empresas de los sectores social y privado de la economía, sujetándolos a las modalidades que dicte el interés público y al uso, en beneficio general de los recursos productivos, cuidando su conservación y el medio ambiente.

El 10 de agosto de 1987 en el Diario Oficial de la Federación se reformó el

párrafo tercero del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, para quedar como sigue:

ARTICULO 27.-

.....

La nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana. En consecuencia, se dictarán las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramientos y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico; para disponer en los términos de la Ley Reglamentaria, la organización y explotación colectiva de los ejidos y comunidades; para el desarrollo de la pequeña propiedad agrícola en explotación; para la creación de nuevos centros de población agrícola con tierras y aguas que les sean indispensables; para el fomento de la agricultura y para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que la propiedad pueda sufrir en perjuicio de la sociedad. Los núcleos de población que carezcan de tierras y aguas o no las tengan en cantidad suficiente para las necesidades de su población tendrán derecho a que se les dote de ellas, tomándolas de las propiedades inmediatas, respetando siempre la pequeña propiedad agrícola en explotación.

Al artículo 73 se le adicionó la fracción XXIX-G para quedar como sigue:

ARTICULO 73.-

I A XXIX-F.-

XXIX-G.- Para expedir leyes que establezcan la concurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de los Estados y de los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico.

Con estas reformas se empezó a establecer una Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, pero aquí les presento algunos artículos de la Ley Ambiental del Distrito Federal con respecto al impacto ambiental en la atmósfera, específicamente de fuentes fijas que involucran a las industrias de la Ciudad de México.

La Ley Ambiental del Distrito Federal está conformada como sigue:

TITULO PRIMERO

DISPOSICIONES GENERALES

- CAPITULO I. Normas comunes (del artículo 1 al 14).
CAPITULO II. De la competencia (artículo 15).
CAPITULO III. De la coordinación metropolitana (del artículo 16 al 19).
-

TITULO SEGUNDO

DE LA POLITICA AMBIENTAL

- CAPITULO I.** Normas Generales (del artículo 20 al 23).
CAPITULO II. Del ordenamiento ecológico (del artículo 24 al 25).
CAPITULO III. Del impacto ambiental
- SECCION I.** Disposiciones comunes (del artículo 26 al 34).
 - SECCION II.** Del contenido del informe preventivo, manifestación o estudio de impacto ambiental o de riesgo. (artículo 25).
 - SECCION III.** Del procedimiento de evaluación de impacto ambiental (del artículo 36 al 53).
- CAPITULO IV.** Estímulos (artículo 54).

TITULO TERCERO

**DE LA PROTECCION Y RESTAURACION DE
LOS RECURSOS NATURALES**

- CAPITULO I.** Del agua y suelo y de la flora y fauna silvestres (del artículo 55 al 59).
CAPITULO II. De las areas verdes (del artículo 60 al 72).
CAPITULO III. De las areas naturales protegidas (del artículo 73 al 90).
-

TITULO CUARTO

DE LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION AMBIENTAL

- CAPITULO I.** Disposiciones generales (del artículo 91 al 100).
- CAPITULO II.** De la contaminación generada por fuentes fijas (artículo 101).
- SECCION I.** Del registro de fuentes fijas y de descargas de aguas residuales (del artículo 102 al 106).
- SECCION II.** De la verificación de emisiones y del tratamiento de aguas residuales (del artículo 107 al 112).
- CAPITULO III.** De la contaminación generada por fuentes móviles (del artículo 113 al 127).
- CAPITULO IV.** De las actividades riesgosas (del artículo 128 al 129).
- CAPITULO V.** De las contingencias ambientales (del artículo 130 al 134).
- CAPITULO VI.** De las medidas de seguridad (del artículo 135 al 136).

TITULO QUINTO

DE LOS PRESTADORES DE SERVICIOS AMBIENTALES

- CAPITULO I.** Disposiciones comunes (artículo 137).
- CAPITULO II.** De los prestadores de servicios de Impacto Ambiental (del artículo 138 al 144).
-

- CAPITULO III.** De los verificadores ambientales (del artículo 145 al 156).
CAPITULO IV. De los laboratorios ambientales (del artículo 157 al 158).

TITULO SEXTO

DE LAS SANCIONES

- CAPITULO UNICO.** Sanciones administrativas (del artículo 159 al 182).

TITULO SEPTIMO

DEL PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO

- CAPITULO I.** Normas generales (artículo 183).
CAPITULO II. Denuncia popular (del artículo 184 al 192).

TRANSITORIOS

(del artículo PRIMERO al DECIMO)

En el Diario Oficial de la Federación del 3 de diciembre de 1994 se publicaron las normas vigentes de calidad del Aire, las cuales son:

VALORES NORMADOS PARA LOS CONTAMINANTES

CONTAMINANTE	VALORES LIMITE		
	EXPOSICION AGUDA		ESPOSICION CRONICA
	CONCENTRACION Y TIEMPO PROMEDIO	FRECUENCIA MAXIMA ACEPTABLE	(PARA LA PROTECCION DE LA SALUD DE LA POBLACION SUSCEPTIBLE)
Ozono (O ₃)	0.11 ppm (1 hora)	1 vez cada 3 años	-
Dióxido de Azufre (SO ₂)	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	0.21 ppm (1 hora)	1 vez al año	-
Monóxido de Carbono (CO)	11 ppm (8 horas)	1 vez al año	-
Partículas suspendidas totales (PST)	260 µg/m ³ (24 horas)	1 vez al año	75 µg/m ³ (media aritmética anual)
Partículas fracción respirable (PM10)	150 µg/m ³ (24 horas)	1 vez al año	50 µg/m ³ (media aritmética anual)
Plomo (Pb)	-	-	1.5 µg/m ³ (promedio aritmético en 3 meses)

La siguiente Ley Ambiental del Distrito Federal se publicó en marzo de 1997 en un suplemento de la revista 26 del suplemento Legislativo de Asamblea

2. LEY AMBIENTAL DEL DISTRITO FEDERAL

TITULO PRIMERO DISPOSICIONES GENERALES

CAPITULO I NORMAS COMUNES

ARTICULO 1.- La presente Ley es de orden público e interés social y tienen por objeto regular la protección del ambiente, así como la prevención y control de la contaminación, la restauración y conservación ecológica del Distrito Federal.

ARTICULO 6.- Para los efectos de la presente Ley, se entiende por:

XV. Emisiones contaminantes: La generación o descarga de materia o energía, en cualquier cantidad, estado físico o forma, que al incorporarse, acumularse o actuar en los seres vivos, en la atmósfera, agua, suelo, subsuelo o cualquier elemento natural, afecte negativamente su composición o condición natural;

XVI. Fuentes fijas: Los establecimientos industriales, mercantiles y de servicios y los espectáculos públicos que emitan contaminantes al ambiente, ubicados o realizados, según corresponda, en el Distrito Federal;

XVII. Plataformas o puertos de muestreo: Instalaciones que permiten el análisis y medición de las descargas de contaminantes o materiales de una fuente fija a la atmósfera, agua, suelo o subsuelo, de acuerdo con las normas oficiales;

**TITULO SEGUNDO
DE LA POLITICA AMBIENTAL**

**CAPITULO I
NORMAS GENERALES**

ARTICULO 22.- Las obras o actividades que se realicen en el Distrito Federal, se sujetarán al ordenamiento ecológico contenido en los programas de desarrollo urbano, así como a la evaluación del impacto ambiental, en su caso, y a las normas de manejo de las áreas naturales protegidas. Las licencias de uso del suelo o de construcción y constancias de zonificación, se sujetarán a estas disposiciones.

**CAPITULO III
DEL IMPACTO AMBIENTAL**

**SECCION I
DISPOSICIONES COMUNES**

ARTICULO 33.- La persona que construya una obra nueva, amplie una existente, realice nuevas actividades industriales, comerciales o de servicios o explote recursos naturales sin contar previamente con la autorización de impacto ambiental respectiva o que contando con ésta incumpla los requisitos y condiciones establecidos en la misma o en esta Ley, estará obligada a reparar los daños ecológicos que con tal motivo hubiere causado a los recursos naturales o al ambiente, sin perjuicio de la aplicación de las sanciones respectivas.

**SECCION II
DEL CONTENIDO DEL INFORME PREVENTIVO,
MANIFESTACION O ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL
O DE RIESGO**

ARTICULO 35.- El informe preventivo, la manifestación o estudio de impacto ambiental o de riesgo, deberán contener lo siguiente:

e) La caracterización de la clase y cantidad de emisiones contaminantes que se generarán, de las fuentes de energía, combustible, sustancias, productos y

recursos naturales que se utilizarán o efectuarán tanto en la construcción y montaje como en el desarrollo de la obra o actividad y como resultado de ésta, incluyendo el tipo y volumen de emisiones a la atmósfera, de consumo de agua, de descargas de aguas residuales y de generación y manejo de residuos;

f) Las medidas de seguridad;

g) La solicitud de inscripción en el registro de fuentes fijas y de descargas de aguas residuales del Distrito Federal;

h) La descripción de las condiciones de operación, así como de los materiales y residuos involucrados en el proceso, incluyendo sus propiedades y características físicas, químicas, corrosivas, tóxicas, reactivas, explosivas, inflamables o biológicas infecciosas.

CAPITULO IV ESTIMULOS

ARTICULO 54.- La Secretaría promoverá el otorgamiento de estímulos fiscales, financieros y administrativos a quienes:

I. Adquieran, instalen y operen las tecnologías, sistemas, equipos y materiales o realicen las acciones que acrediten prevenir o reducir en más del treinta por ciento los límites de emisiones contaminantes establecidos por las normas oficiales, o prevenir o reducir en esa proporción el consumo de agua o energía, y;

II. Realicen desarrollos tecnológicos viables cuya aplicación demuestre prevenir o disminuir en más del treinta por ciento la emisión de contaminantes, el consumo de agua potable o de energía.

**TITULO CUARTO
DE LA PREVENCION Y CONTROL DE LA
CONTAMINACION AMBIENTAL**

**CAPITULO II
DE LA CONTAMINACION GENERADA POR
FUENTES FIJAS**

ARTICULO 101.- Los propietarios o poseedores de fuentes fijas de la competencia de la Administración Pública del Distrito Federal que emitan contaminantes, están obligados a:

I. Cumplir con los límites de emisiones contaminantes y con los requisitos, procedimientos y métodos establecidos en las normas oficiales o en las condiciones particulares de descarga;

IV. Proporcionar en los términos de las normas oficiales y en los formatos determinados por la Secretaría, un inventario de sus emisiones contaminantes, incluyendo su naturaleza y cantidad;

VII. Contar con plataformas y puertos de muestreo para la medición y análisis

de sus emisiones contaminantes, en los términos fijados por las normas oficiales:

VIII. Dar aviso inmediato a la Administración Pública del Distrito Federal y tomar las medidas conducentes en caso de emisiones contaminantes, accidentes, fugas, derrames, explosiones o incendios que pongan en peligro o afecten la integridad de las personas o del ambiente.

**TITULO SEXTO
DE LAS SANCIONES**

**CAPITULO UNICO
SANCIONES ADMINISTRATIVAS**

ARTICULO 160.- Se sancionará con multa de veinte a mil días de salario mínimo a los propietarios o poseedores de fuentes fijas:

I. Cuyas descargas de agua residual o emisiones contaminantes a la atmósfera, agua, suelo o subsuelo rebasen del 0.1% al 50% los límites establecidos en las normas oficiales o condiciones particulares de descarga, por cada límite.

IV. Cuyas emisiones contaminantes por energía térmica, lumínica o visual, rebasen los límites determinados por las normas oficiales.

APENDICE A

MODELO TRIDIMENSIONAL DE MESOESCALA APLICADO A LA PREDICCIÓN DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL VALLE DE MÉXICO

GUSTAVO SOSA, Química Ambiental, Instituto Mexicano del Petróleo, AP. 14-805, MEXICO, D.F. 07730

MICHEL WILLIAMS, Los Alamos National Laboratory, Group A-4 Mail Stop 8299, Los Alamos, NIM 87545

RINA AGUIRRE, División de Estudios de Posgrado, Facultad Ingeniería, UNAM, AP. 70-256, MEXICO D.F. 04510

I. RESUMEN

En el presente trabajo se emplea un modelo de mesoescala, tridimensional con turbulencia a segundo orden para el cálculo del flujo atmosférico dentro del Valle de México. Se presentan resultados arrojados por el modelo para perfiles de temperatura potencial, contenido de vapor de agua y fluctuaciones de la componente vertical del viento, generada por la turbulencia. Además, se presentan comparaciones del campo de viento calculado con los valores medidos en algunas estaciones de monitoreo.

2. INTRODUCCION

Como resultado de los altos índices de contaminación en la Ciudad de México, diversos grupos de científicos se han dado a la tarea de estudiar los aspectos fundamentales que la generan, así, grupos de experimentalistas y teóricos tratan de descubrir el origen y consecuencias que la contaminación del aire produce a los seres vivos y a sus bienes materiales. Dentro de la línea teórica, el desarrollo de modelos matemáticos ha sido de vital importancia, ya que se han implementado modelos capaces de predecir condiciones meteorológicas a diferentes escalas especiales y temporales, (Pielke, 1984, Cotton, 1975). Con respecto a los modelos de dispersión de contaminantes, también se encuentran desde los modelos más simples como el gaussiano, hasta modelos de escala global capaces de predecir el transporte de partículas a nivel continental (Pielke, and McNider 1983; McHenry 1991).

El desarrollo de modelos de dispersión y meteorológicos en México ha estado limitado; la necesidad de ese desarrollo comienza a surgir con los graves problemas de contaminación del aire, en particular de la Ciudad de México. Actualmente es necesario evaluar las posibles medidas de control, por anticipado, sin tener que recurrir a su aplicación a ciegas y esperar sus consecuencias, con el consecuente riesgo de fracasar. En este sentido la aplicación del modelo HOTMAC (High Order Turbulence of Atmospheric Difusion) en conjunción con el modelo fotoquímico CIT (Carnegie/Caltech Institute of Technology), están siendo adaptados a las características físicas del Valle de México (ZMCM) con el fin de utilizarlos en la evaluación de la calidad del aire de la ciudad. Este esfuerzo está coordinado por el Instituto Mexicano del Petróleo y el Laboratorio Nacional de los Alamos, USA, con

la colaboración de instituciones como UNAM, DDF, SEDESOL, SMN, entre otras.

Resultados preliminares encontrados para el mes de febrero de 1995 se presentan como avance de la adaptación del Modelo HOTMAC en el cálculo de campo de viento dentro del Valle de México. Comparaciones con los valores reportados por las estaciones de monitoreo meteorológico son presentadas.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

HOTMAC es un modelo matemático tridimensional y con evolución en el tiempo. Para facilitar la descripción de las condiciones de frontera, HOTMAC transforma la coordenada vertical en una coordenada que sigue la topografía (ec. 1).

$$z^* = \eta \frac{z - z_g}{h - z_g} \quad (\text{ec. 1})$$

En donde el significado de las variables y constantes están en la figura 1.

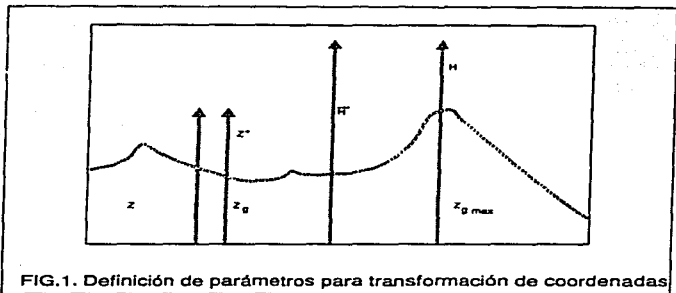


FIG.1. Definición de parámetros para transformación de coordenadas

Las ecuaciones que lo describen consideran transporte de momento lineal, conservación de energía y de humedad, así como transporte de energía turbulenta y longitud de escala turbulenta. La cerradura del sistema de ecuaciones se hace con un modelo de segundo orden en los flujos verticales turbulentos de las variables mencionadas (Yamada, 1963).

Para la solución numérica, el modelo utiliza dos mallas anidadas de diferente resolución; para la malla gruesa $6 \times 6 \text{ Km}^2$ y para la malla fina $2 \times 2 \text{ km}^2$. Por su parte la malla fina contiene a la zona urbana de la Ciudad de México y sus municipios conurbados. Las condiciones de frontera se determinan para ambas mallas y son las

siguientes:

3.1 LIMITE INFERIOR

Las condiciones de frontera para las ecuaciones (A1), (A2) y de (A4) a (A7), son dadas por las fórmulas empíricas de Dyer and Hicks (1970). Para la temperatura del suelo se integra la ecuación de conducción de calor con un balance energético en la interface suelo-aire adecuado (Yamada et al 1969).

Ecuación de conservación para la componente este-oeste del momento lineal.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = f(V - V_g) - g \frac{H - z^*}{H} \left(1 - \frac{\partial \ln \theta}{\partial V} \right) \frac{\partial \bar{z}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{xy} \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\eta}{H - z_g} \frac{\partial}{\partial z} (-\bar{u}w)$$

(A1)

Ecuación de conservación para la componente norte-sur del momento lineal.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} = & - f(U - U_g) + g \frac{H - z^*}{H} \left(1 - \frac{\partial \ln \theta}{\partial V} \right) \frac{\partial \bar{z}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (K_{xy} \frac{\partial V}{\partial x}) \\ & - \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\eta}{H - z_g} \frac{\partial}{\partial z} (-\bar{u}w) \end{aligned}$$

(A2)

Ecuación de la continuidad de la masa con la aproximación hidrostática y expresada en el sistema de coordenadas transformado.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} - \frac{1}{H^2 \sigma} (U \frac{\partial \sigma}{\partial X} + V \frac{\partial \sigma}{\partial Y}) = 0$$

(A3)

Ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta, la cual es la suma de energías cinéticas de los términos de auto correlación para cada una de las componentes del viento.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\frac{q^2}{2}) &= \frac{\partial}{\partial X} [K_x \frac{\partial}{\partial X} (\frac{q^2}{2})] + \frac{\partial}{\partial Y} [K_y \frac{\partial}{\partial Y} (\frac{q^2}{2})] \\ &+ (\frac{H}{H^2 \sigma})^2 \frac{\partial}{\partial Z} [K_z \frac{\partial}{\partial Z} (\frac{q^2}{2})] - (\frac{H}{H^2 \sigma}) (\overline{u'v'} \frac{\partial V}{\partial Z} - \overline{v'u'} \frac{\partial V}{\partial Z}) - \beta \sigma \overline{\omega \theta} - \frac{q^3}{1.6 l} \end{aligned}$$

(A4)

Ecuación para la variable turbulenta $q^2 l$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (q^2 l) &= \frac{\partial}{\partial X} [K_x \frac{\partial}{\partial X} (q^2 l)] + \frac{\partial}{\partial Y} [K_y \frac{\partial}{\partial Y} (q^2 l)] + (\frac{H}{H^2 \sigma})^2 \frac{\partial}{\partial Z} [K_z \frac{\partial}{\partial Z} (q^2 l)] \\ &- 1. F_1 \{ (\frac{H}{H^2 \sigma}) (\overline{u'v'} \frac{\partial U}{\partial Z} - \overline{v'u'} \frac{\partial U}{\partial Z}) - \beta \sigma \overline{\omega \theta} \} - \frac{q^3}{l} (1 + F_2 (\frac{l}{K z})^2) \end{aligned}$$

(A5)

Ecuación de conservación de la energía, establecida a través de la ecuación de transporte de temperatura potencial.

$$\frac{D\theta}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial \theta}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial \theta}{\partial y}) - \frac{\eta}{H^2 \bar{z}_p} \left[\frac{\partial}{\partial z} (-\theta w) - \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial \rho \theta}{\partial z} \right]$$

(A6)

Ecuación de conservación de la razón de mezclado de humedad.

$$\frac{DQ_v}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial Q_v}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial Q_v}{\partial y}) - \frac{\eta}{H^2 \bar{z}_p} \frac{\partial}{\partial z} (-Q_v w)$$

(A7)

Para mayor detalle sobre estas ecuaciones se propone consultar a Yamada (1981).

3.2 LIMITE SUPERIOR

Para las componentes horizontales del viento, sus valores se determinan por los vientos geostróficos calculados internamente, dados por la siguiente relación:

$$(U, V) = 1/f \left(-\frac{\partial P}{\partial y}, \frac{\partial P}{\partial x} \right), \quad (\text{ec. 2})$$

En donde f es el parámetro de Coriolis y P es la presión U y V son las componentes horizontales del viento. La temperatura potencial y humedad se especifican como datos de entrada. Las variables turbulentas se suponen anuladas, ya que en la superficie los efectos de la frontera inferior son nulos.

3.3 FRONTERAS LATERALES

Para la malla gruesa los valores se determinan resolviendo las ecuaciones (A1) a (A7), suponiendo que variaciones en las direcciones horizontales se desprecias. Para la malla fina se obtienen directamente por los valores de la malla gruesa en los límites del área anidada.

3.4 CONDICIONES INICIALES

El perfil de viento inicial en la zona del aeropuerto (ver fig. 2), punto en donde se realiza el radiosondeo atmosférico, se supone que sigue un comportamiento logarítmico desde el suelo hasta el nivel en el que alcanza el viento geostrófico. Para el resto de la malla, se escala este perfil de tal manera que satisfaga la continuidad de la masa. El perfil vertical para la temperatura potencial se supone lineal con la altura, los valores particulares de dicha relación se obtienen a partir de los perfiles de temperatura potencial, presión y valores observados por el radiosondeo. La inicialización de los términos turbulentos se hace utilizando las relaciones encontradas por Yamada (1975).

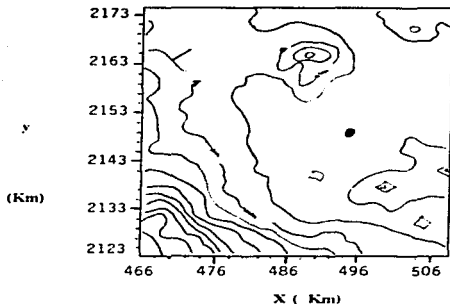
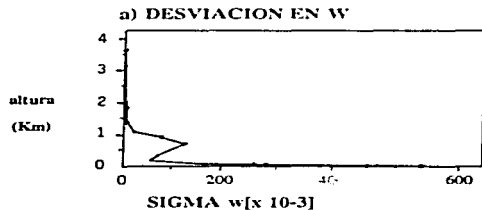


FIG. 2 Malla fría de resolución 2x2 km, para el modelo. El punto estable la posición del Aeropuerto, en la zona este de la ciudad.

4. DESARROLLO

Durante el mes de febrero de 1995 como parte de las actividades del proyecto Estudio Global de la Calidad del Aire (EGCA), se llevó a cabo una campaña intensiva de monitoreo atmosférico y de parámetros de calidad del aire para el Valle de México. El interés fundamental de tal campaña, es calibrar el modelo con los detalles particulares de la región (albedo, balance energético y situación geográfica, entre otros).

El sondeo atmosférico se realizó en aeropuerto de la Ciudad de México, extendiéndose a 7 sondeos diarios, el lugar de los dos que normalmente se realizan. Por haber sido el 22 de febrero el día que se recolectó más información, fue elegido para hacer las comparaciones entre los cálculos del modelo y los valores medidos en las estaciones de monitoreo.



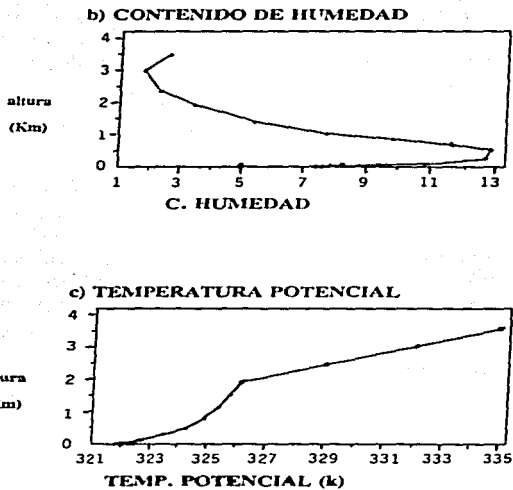


FIG. 3

Cálculos de a) T_w , b) Contenido de humedad y c) Temperatura potencial para febrero 22 a las 3:00 a.m.

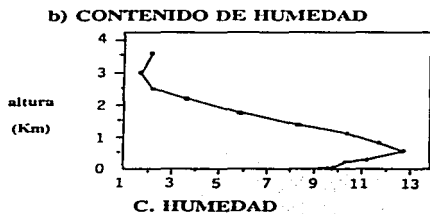
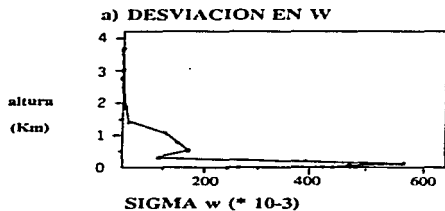
En la figura 3 se presenta la fluctuación en la velocidad vertical, medida por la variable T_w , la temperatura potencial y el contenido de vapor de agua, calculados para las 3:00 a.m.. La primera variable determina el grado de turbulencia en la dirección vertical (dilución atmosférica). Como se puede apreciar, la actividad de mezclado está restringida a los primeros 100 metros y es notable la correlación que guardan las 3 variables. Existe una inversión térmica hasta una altura de 500 metros y el mayor contenido de humedad se limita a este intervalo.

En las figuras 4 y 5 se presentan las mismas variables par las 10:00 y las 13:00 horas, respectivamente. Como se puede observar en la figura 4.a, la inversión térmica se ha roto y existe una inestabilidad atmosférica a 300 metros, la distribución de humedad, (fig. 4.b), se ha extendido a esta misma altura, la agitación térmica en la componente vertical (T_w), como se ve en la Fig 4-a, se incrementó en magnitud, pero en la altura no se nota gran diferencia con respecto a la calculada para las 3:00 hrs.

En la fig. 5 se puede apreciar el incremento en el transporte vertical, el cual alcanza una altura de 1500 m aproximadamente, lo mismo sucede con el contenido de humedad (fig. 5-b). Para la temperatura potencial (fig. 5-c) se aprecia una inestabilidad hasta 1km, aproximadamente.

En la fig. 6 se presentan campos de viento calculados a 14 metros de altura sobre el terreno para distintas horas del día. Las flechas desplazadas representan los valores de viento medido. A las 6:00 horas (fig. 6-a) se distingue un flujo de aire fino descendente de la Sierra del Ajusco hacia la Ciudad, generando un campo convergente. A esta hora de la mañana el sol no ha calentado lo suficiente la tierra como para poder invertir dicho patrón, el viento reportado está prácticamente en

calma y sus magnitudes son del mismo orden comparadas con las del modelo. Para las 10:00 horas (fig. 6-b), el modelo continua reportando una situación convergente, pero de menor intensidad, mientras que el viento medido reporta un cambio de dirección. A las 11:00 horas (fig. 6-c) el modelo reproduce el cambio de dirección, y a las 12:00 horas (fig. 6-d), modelo y mediciones coinciden en el patrón de dispersión. Para reproducir adecuadamente la inversión de dirección del viento se deben introducir algunas mejoras al modelo.



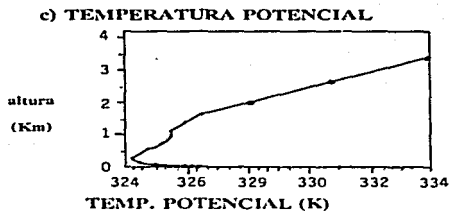
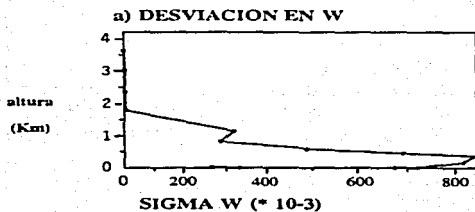


FIG. 4

Cálculos de a) g_{w} , b) Contenido de humedad y c) Temperatura potencial para febrero 22 a las 10:00.



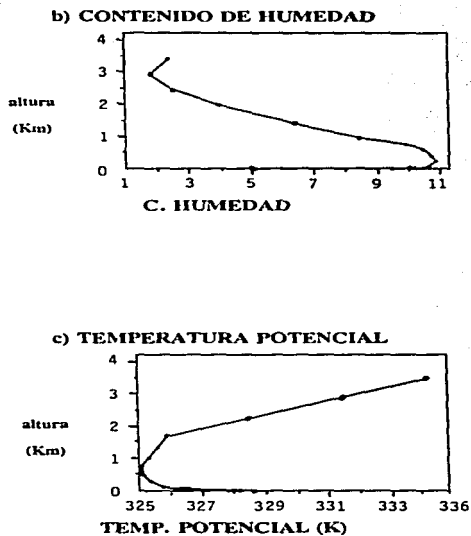
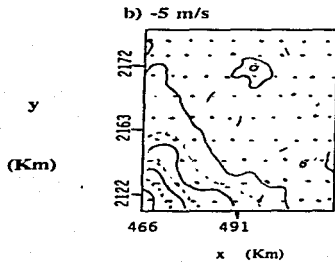
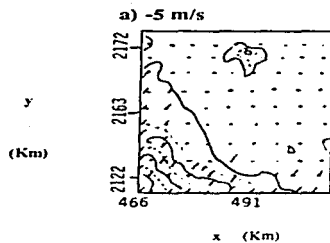


FIG. 5 Cálculos de a) g_m , b) Contenido de humedad y c) Temperatura potencial para febrero 22 a las 13:00.

MODELO TRIDIMENSIONAL DE MESOESCALA APLICADO A LA PREDICCIÓN
DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL VALLE DE MÉXICO



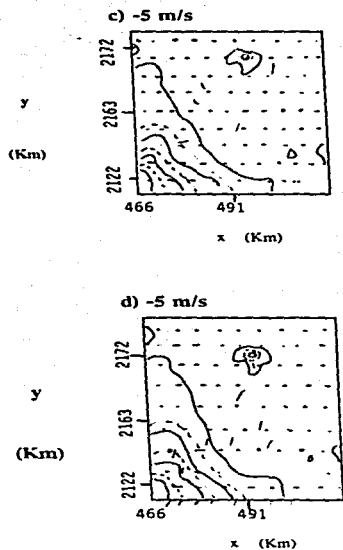


FIG. 6 Comparación del campo de viento calculado con los vientos medidos para a) 6:00, b) 10:00, c) 11:00, d) 12:00 del día 22 de febrero.

APENDICE B

FACTORES DE TOLERANCIA PARA EMISIONES BASADOS EN UN TIEMPO DE PROMEDIO COMUN DE 24 HORAS.

CONTAMINANTE	MEXICO (Kg)	ESTADOS UNIDOS (Kg)
Monóxido de carbono (CO) Basado en las normas de EUA (8 horas) = 9 ppm y México (8 horas) = 13 ppm	11300	7800
Oxido de Nitrógeno (NO _x) Basados en las normas anuales de EUA = 0.05 ppm y México (1 hora) = 0.21 ppm (Ambos valores multiplicados por 2 para incluir tanto los efectos del NO como del NO ₂)	360	330
Dióxido de Azufre (SO ₂) Basado en las normas de EUA (24 horas) = 0.14 ppm y México (1 hora) 0.13 ppm	340	365
Hidrocarburos (HC) Basados en el criterio usado en EUA para las horas matutinas de mayor tránsito = 0.24 ppm	800*	800
Partículas suspendidas totales (PST) Basado en las normas de EUA (24 horas) = 260 µg/m ³ y México (24 horas) = 275 µg/m ³	275	260
Partículas menores a 10 micrómetros (PM ¹⁰) Basado en la norma de EUA (24 horas) = 150 µg/m ³	150*	150
Plomo (Pb) Basado en la norma de EUA (3 meses) = 1.5 µg/m ³	3.9*	3.9

* México no tiene criterios oficiales para estos contaminantes

FUENTE: Quadri de la Torre G., Sánchez Cataño, L.R., "La Ciudad de México y la Contaminación Atmosférica", Limusa, 1992, MEXICO.

Los datos anteriores representan los factores de tolerancia que equivalen a 1 UTE (unidad de toxicidad equivalente).

Por la tabla anterior conocemos que el monóxido de carbono es más tolerable que los contaminantes citados, (en otros términos, el menos tóxico por unidad de masa), mientras que los óxidos de nitrógeno son los menos que se toleran, por ejemplo, expresándolo en manera sencilla, el CO es $11300/300 = 38$ veces más tolerable que los NO_x .

CONCLUSIONES

Para solucionar el problema de la Contaminación en las descargas atmosféricas es necesario que todas las empresas contaminantes (fuentes fijas) apliquen el método de absorción o el método de adsorción, los cuales tienen ventajas y desventajas que se presentan en este trabajo.

A pesar de que uno de los obstáculos que evitan la aplicación de dichos métodos es el económico, el Gobierno del Distrito Federal ha creado algunas estrategias, donde existen premios económicos, es decir, estrategias de incentivos económicos específicamente incentivos fiscales para el uso de tecnologías de control de emisiones en la industria.

Para que el control de las emisiones contaminantes atmosféricas sea eficaz es necesario utilizar los métodos de absorción y adsorción, que por ejemplo, para el control de las emisiones del óxido y bióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno se puede usar el método de adsorción, para el monóxido de carbono y los hidrocarburos el método de absorción.

Hay que aprovechar la buena disposición del gobierno para disminuir las emisiones atmosféricas contaminantes, para implantar de tecnologías industriales útiles para tal fin en la ZMCM, ya que se podrá contar como ya se mencionó anteriormente con la utilización de incentivos fiscales vigentes, exenciones arancelarias y nuevos créditos internacionales para financiar la reconversión tecnológica.

Existen algunos procesos en donde se adaptaron los métodos de absorción y adsorción, por lo que sólo falta la buena disposición de los empresarios industriales por mejorar la calidad del aire en la ZMCM y aplicar el método que más ventajas

CONCLUSIONES

presente para la obtención de buenos resultados y por que no, el que más convenga a sus intereses.

En conclusión la adquisición de equipos anticontaminantes y/o tecnología de punta para disminuir las emisiones contaminantes a la atmósfera depende en gran parte de la aplicación, funcionamiento y vigilancia de un programa existente para mejorar la calidad del aire en el Valle de México en el año 1995-2000, por lo que una buena alternativa para el sector industrial son los dos procesos que en esta tesis hago mención, espero que sea de utilidad la información contenida en ésta.

BIBLIOGRAFIA

ACGIH, (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*), *Industrial Ventilation, a Manual of Recommended Practice* 18 th Edition, 1984.

ALDEN JOHN, *Design of Industrial Ventilation Systems*, 5 th Edition, Industrial Press Inc. 1982.

A.L. KOHL AND F.C. RIESENFELD, "*Gas Purification*", Mc Graw-Hill, 1960, NEW YORK.

ATLAS DE LA CIUDAD DE MEXICO (1987), Departamento del Distrito Federal (DDF) y el Colegio de México (CM).

BEISER, ARTHUR, "*Física Aplicada*", McGraw-Hill, 1987, MEXICO.

BRAVO H., "*La Contaminación del Aire en México*", Universo Veintiuno, 1987.

BRODKEY, R., HERSHEY, H., *Transport Phenomena*, McGraw Hill, 1988.

CATELLAN, GILBERT W., "*Fisicoquímica*", Fondo Educativo Interamericano, S.A., 1974, USA.

COMISION METROPOLITANA PARA LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION AMBIENTAL EN EL VALLE DE MEXICO "*La Contaminación Atmosférica en el Valle de México, acciones para su control 1988-1994*", MEXICO.

- COMISION NACIONAL DE DERECHOS HUMANOS. *"La contaminación atmosférica en México, sus causas y efectos en la salud"*, 1992, MEXICO.
- CONRAD P. STRAUB, M.C.E., P.H.D., *"Practical Handbook of Environmental Control"*, Editorial CRC Press, Inc. 2a. Impresión, 1990, USA.
- COTTON, W. R., *"Theoretical Cumulus Dynamics"*, Rev. Geophys, SPA, PHYS. 1975.
- COULSON, J. M. AND J. F. RICHARDSON, *"Chemical Engineering"*, Vol. 2, Pergamon Press, 1971, USA.
- COULSON, J. M. AND J. F. RICHARDSON, *"Chemical Engineering"*, Vol. 3, Pergamon Press, 1971, USA.
- C. S. RAO *"Environmental Pollution Control Engineering"*, Editorial, John Wiley & Sons, 1991, NUEVA DELHI, INDIA.
- DALLA VALLE, J. M., *"Exhaust Hoods"*, The Industrial Press Inc., 1952, USA.
- DDF, *"Short Term Program DDF - WB Air Pollutants Emissions Inventory for Mexico City Metropolitan Area"*, Inédito, 1990, MEXICO.
- DDF, SEDUE, *"Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de México 1995 - 2000"*, 2a. Impresión, 1996, México.
- DYER, A. J., AND B. B. HICKS, *"Flux - Gradient Relationships in the Constant"*
-

BIBLIOGRAFIA

Flux Layer", J. Atmos. SCI., 1970.

FOUST, ALAN S. ET AL, "*Principios de Operaciones Unitarias*", Cia., Editorial Continental, S.A. de C.V., 1987, MEXICO.

H. BRAUER AND Y. B. G. VARMA, "*Air Pollution Control Equipment*", Springer - Verlag, 1981, BERLIN.

JAUREGUI E., "*Erosión Eólica en los suelos vecinos al lago de Texcoco*", Ingeniería Hidráulica en México, Vol. 25, 1971.

LINCH, JEREMIAH, "*Computer Design of Industrial Exhaust Systems*", Heating, Piping and Air Conditioning, September, 1968.

MADDOX, ROBERT N., HINES ANTHONY L., "*Transferencia de Masa*", Prentice Hall, 1984, MEXICO.

McDERMONT, HENRY, "*Handbook of Ventilation for Contaminant Control*", Ann Arbor Science, 1986.

McHENRY, J. N., BINKOWSKI, F. S., DENNIS, R. L., CHANG, J. S., AND HOPKINS, D., "*The Tagged Species Engineering Model (TSEM)*", Atmos. ENVI., 26A.

PARKER, ALBERT, "*Contaminación del Aire por la Industria*", LIMUSA, 1983, MEXICO.

BIBLIOGRAFIA

PIELKE, R. A., McNIDER R. T., SEGAL M., AND MAHRER Y., "*The use of a mesoscale numerical model for evaluations of pollutant transport and diffusion in coastal regions and over irregular terrain*". Bul. Am. Met. Soc.; 1983.

PIELKE R. A., "*Meso-scale meteorological Modeling*", Published by Academic Press, 1984.

QUADRI DE LA TORRE, G., SANCHEZ CATAÑO, L. R., "*La Ciudad de México y la Contaminación Atmosférica*", Limusa, 1992, MEXICO.

RANALD V. GILES, "*Mecánica de los fluidos e hidráulica*", McGraw-Hill, 1981, MEXICO.

SANDLER, STANLEY I., "*Termodinámica, en la Ingeniería Química*", Nueva Editorial Interamericana, 1981, MEXICO.

SEDESOL, "*Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*", Secretaría de Desarrollo Social, MEXICO.

SEDUE (sin año), "*Contaminación Atmosférica en el Valle de México*", Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.

SEDUE, "*Curso sobre Evaluación de la Calidad del Aire - Técnicas Manuales*", 1985, MEXICO.

SMITH, J. M., "*Chemical Engineering Kinetics*", McGraw-Hill, 1970, USA.

STRAUSS, W., MAINWARING, S. J., "*Contaminación del Aire - causas, Efectos y Soluciones*", Editorial Trillas, 1990, MEXICO.

STERN, A. C., "*Air Pollution*", Vol. 1, 2ª Ed., Editorial Academic Press, 1968, USA.

STERN A., BOVEL W., TURNER B., FOX D., "*Fundamentals of Air Pollution*", Second Edition, Editorial Academic Press, 1984, USA.

SUTTON, O. G., "*The Dispersion of Hot Gases in the Atmosphere*", Journal of Metereology, Vol. 7, Oct. 1950.

TIM, JOHN A. "*Química General*", McGraw-Hill, 1985, MEXICO.

TURK, WITTES, "*Tratado de Ecología - Contaminación del Aire*", Nueva Editorial Interamericana, S.A. de C.V., 1979, MEXICO.

WARK, KENNETH, WARNER, CECIL F., "*Contaminación del Aire, Origen y Control*", Editorial Limusa, 1992, MEXICO.

YAMADA, T., AND G. L. MELLOR, "*A Simulation of the Wangara Atmospheric Bonndary Layer Data*", J. Atmos. SCI, 1975.

YAMADA T., "*A Numerical Simulation of Nocturnal Drainage Flow*", J. Met, Soc. Jap., 59.

YAMADA T., "*Simulations of Nocturnal Drainage Flows by q^2 Turbulence*"

Closure Model", J. Atmos. SCI, 1983.

YAMADA T., M. WILLIAMS "*Chemical Downwind Hazard Modeling Study*".
Internal Report, LA-UR-89-1061, Laboratorio Nacional de Los Alamos, NM, 1989.