



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CONTAMINACION ATMOSFERICA EN LA ZMCM Y
TECNOLOGIAS PARA LA REDUCCION DE
EMISIONES EN FUENTES FIJAS.

FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
EN EL AREA DE MECANICA
P R E S E N T A N :
JORGE ANTONIO MORA GARCIA
ISRAEL JAUREGUI NARES
JOSE ENRIQUE MORALES SAHAGUN

DIRECTOR DE TESIS ING. VICENTE G. LOPEZ FERNANDEZ



MEXICO, D. F.

1995

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTAMINACION

ATMOSFERICA EN LA ZMCM

Y TECNOLOGIAS PARA LA

REDUCCION DE EMISIONES EN

FUENTES FIJAS.

**A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
por habernos brindado todas las facilidades en la
realización de nuestros estudios superiores.**

**A los maestros de la Facultad de Ingeniería por brindarnos
sus experiencias y conocimientos.**

**Al Ing. VICENTE G. LOPEZ FERNANDEZ por su valiosa dirección
y dedicación, que nos llevo a concluir el presente trabajo.**

A DIOS:

Por haberme dado la oportunidad de concluir una de mis primeras metas.

A MIS PADRES:

Por su gran ejemplo de lucha, por todo su apoyo, confianza y amor a lo largo de mi vida

A MIS ABUELOS:

Por su gran paciencia y fortaleza que me alientan a ser mejor cada día.

A MIS HERMANOS:

Con quienes he tenido la dicha de convivir toda mi vida para que sigamos siempre unidos.

A MIS AMIGOS:

Porque su confianza amistad y cariño hacen la vida más grata.

A JORGE Y ENRIQUE:

Por compartir momentos gratos, por su forma de ver la vida y por el gran esfuerzo en la realización de este trabajo.

ISRAEL JAUREGUI NARES

A MIS PADRES, A MIS HERMANOS, PARIENTES Y AMIGOS:

Por apoyarme en la realización de mis metas y por sus esfuerzos para soportar estos tiempos.

JOSE ENRIQUE MORALES SAHAGUN

A MI PADRE Y A MI MADRE:

Por apoyarme incondicionalmente bajo cualquier circunstancia, por haberme educado con el ejemplo, por alentarme a alcanzar mis metas, por haber confiado en mi y por todo su amor.

A ADRIANA Y GABRIELA:

Por haber convivido conmigo a lo largo de mi vida, por compartir mis alegrías y tristezas, y por su apoyo.

A MIS PRIMOS Y TIOS:

Por haber convivido conmigo y por su apoyo.

A ISRAEL Y JOSE:

Por su amistad y compañerismo a lo largo de tantos años.

A MIS AMIGOS Y AMIGAS:

Por compartir muy gratos momentos.

JORGE ANTONIO MORA GARCIA

OBJETIVOS.

El objetivo del presente trabajo es contribuir a una mejor comprensión a nivel general del problema de la contaminación atmosférica, al describir los efectos de la contaminación en la salud humana, el impacto al medio ambiente, así como la correspondiente reglamentación y monitoreo actual de las principales zonas urbanas y en especial de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

Además de analizar las tecnologías aplicadas para el tratamiento de emisiones contaminantes originadas en fuentes fijas (NO_x , SO_x y Partículas).

INDICE

INTRODUCCION.

Página

PARTE I

CONTAMINACION ATMOSFERICA

1.-IMPACTO GLOBAL DE LA CONTAMINACION.....	1
1.1.- CONTAMINACION AMBIENTAL Y SUS EFECTOS.....	2
1.2.- CONTAMINACION DEL AIRE Y SUS EFECTOS.....	6
2.-DESCRIPCIÓN DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFERICOS EN	
LA ZMCM Y SUS EFECTOS EN LA SALUD.....	17
2.1.- PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL AIRE.....	17
2.2.- PROBLEMAS EN LA SALUD DEBIDO A LA CONTAMINACION	
DEL AIRE.....	27

PARTE II

CONTAMINACION EN LA ZMCM Y SU REGLAMENTACION

3.-MONITOREO Y EVOLUCION DE LA CALIDAD

DEL AIRE EN LA ZMCM.....33

3.1.- ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO (ZMCM).....33

3.2.- EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

(CRITERIOS DEL IMECA).....38

3.3.- MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE

(RED NACIONAL DE MONITOREO).....43

4.-LEYES Y REGLAMENTOS PARA EL CONTROL DE LA

CONTAMINACION ATMOSFERICA.....51

4.1.- PROGRAMAS PARA LA PROTECCION AL MEDIO AMBIENTE.....54

4.2.- LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y

LA PROTECCION AL MEDIO AMBIENTE.....57

PARTE III

TECNOLOGIAS PARA EL CONTROL DE EMISIONES CONTAMINANTES EN FUENTES FIJAS

5.-TECNOLOGIAS PARA LA REDUCCION DE OXIDOS DE NITROGENO.....	69
5.1.- MECANISMO DE FORMACIÓN DE NO_x.....	69
5.2.- TECNOLOGÍAS PARA LA REDUCCIÓN DE NO_x EN CALDERAS CONVENCIONALES.....	73
5.3.- TECNOLOGÍAS PARA LA REDUCCIÓN DE NO_x EN MOTORES DIESEL Y TURBINAS DE GAS.....	88
6.-DESULFURIZACION DE GASES DE ESCAPE.....	99
6.1.- CONSIDERACIONES IMPORTANTES.....	99
6.2.- DESULFURIZACION HUMEDA.....	101
6.3.- SISTEMAS FGD SECOS SIN GENERACION DE SUB - PRODUCTOS.....	111
6.4.- PROCESOS REGENERATIVOS FGD.....	116
7.-TECNOLOGIAS Y EQUIPO PARA EL TRATAMIENTO DE PARTICULAS..	123
7.1.- DESARROLLO DE TECNOLOGIAS PARA EL TRATAMIENTO DE PARTICULAS.....	123
7.2.- TEORIA DE COLECTORES DE PARTICULAS.....	129

CONCLUSIONES.....151

BIBLIOGRAFIA.....153

INTRODUCCION

Las zonas urbanas de todo el mundo al igual que las de nuestro país, presentan un alto índice de riesgo por contaminación atmosférica. Por eso, es necesario evaluar el impacto global de la contaminación en el medio ambiente y los fenómenos que repercuten a nivel mundial y local, como pueden ser el deterioro en la capa de ozono en la estratósfera, la lluvia ácida o el efecto invernadero.

México es uno de los países más industrializados de Latino América y también con más problemas de contaminación; debido en gran parte a la continua migración interna de las zonas rurales a las grandes zonas urbanas, provocando que más de dos terceras partes de los mexicanos ahora vivan en las principales ciudades del país como son: Guadalajara, Monterrey y en especial en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

Precisamente en la ZMCM, los contaminantes derivados de las fuentes fijas y móviles generan gran parte del volumen de contaminación, lo que representa un serio peligro para las poblaciones urbanas cercanas a éstas y la frecuente exposición a concentraciones de diversos contaminantes con diferentes potenciales tóxicos generan una variedad de efectos negativos sobre la salud humana.

Es importante conocer como se evalúa la contaminación atmosférica en la ZMCM, mediante los sistemas de monitoreo manual y automático, los cuáles se basan en el criterio denominado "Índice Metropolitano de la Calidad del Aire / (IMECA)", además de conocer la descripción, análisis y comportamiento de los contaminantes.

Cabe señalar que en México las políticas ambientales se encuentran en evolución, tales políticas engloban la reglamentación y normatividad existente, así como las principales funciones de las diferentes dependencias gubernamentales vinculadas con este tema.

Las tecnologías para tratamiento de emisiones contaminantes que han tenido un importante desarrollo en la última década, son aquellas aplicadas al control de; NO_x , SO_x y Partículas Suspendidas Totales, generadas en fuentes fijas.

Para ello, en el presente trabajo se realiza una extensa recopilación y análisis de información sobre nuevas tecnologías aplicadas a fuentes fijas así como de los temas antes mencionados.

PARTE I

CONTAMINACION ATMOSFERICA.

1.- IMPACTO GLOBAL DE LA CONTAMINACION

El medio ambiente - definido como el conjunto de circunstancias o condiciones físicas y químicas (naturales), exteriores al ser humano que influyen en su desarrollo y en sus actividades fisiológicas - es una entidad propia. La utilización adecuada del medio ambiente depende del conocimiento de sus rocas, sus cuerpos y corrientes de agua; de los suelos, su vegetación actual y potencial; la vida animal y sus posibilidades potenciales para la cría de ganado así como el clima en general.

Así como las dimensiones de la tierra o los rayos solares que inciden sobre ella , o el potencial de productividad vegetal son cantidades finitas, así mismo, es la capacidad de la naturaleza para satisfacer las necesidades del ser humano.

El hombre a lo largo de la historia y de su evolución se ha valido de la capacidad de la naturaleza para absorber modificaciones o cambios que sobre ella se han hecho para satisfacer sus "*necesidades*".

Los diversos ecosistemas poseen una cierta capacidad para recibir, transformar y recircular infinidad de productos, entre ellos, los desechos generados por el ser humano y por la industria, pero el hombre ha hecho uso de esta capacidad irracionalmente sin conocer el límite (cantidad finita) de absorción de estas modificaciones por parte de la naturaleza.

Cuando el hombre modifica al medio ambiente con la finalidad de satisfacer sus necesidades cultivando alimentos, criando ganado, construyendo presas y carreteras, establece industrias y zonas urbanas en donde se concentran grandes masas de gente; a su vez las actividades de la gente modifican al medio ambiente y hasta a veces lo modifican a tal grado que las propias actividades del ser humano se vuelven casi imposibles de realizar.

Los cambios en el medio ambiente que afectan al hombre son el resultado de la magnitud, en calidad y cantidad de fenómenos causados por la actividad humana. La industria por su parte con su afán de aumentar la productividad no se había preocupado por el destino de sus desechos. Pero existe como ya se dijo un "límite extremo", el cual sería la cantidad máxima de un elemento, sustancia, energía u organismo que puede ser arrojado al medio ambiente sin que sobrevenga un cambio inaceptable.

Si esa sustancia se libera en una cantidad mayor en el lugar y momento inoportuno, la naturaleza no podrá absorberla y por lo tanto se transformará en un *medio ambiente contaminado*.

El hombre ha producido siempre algún tipo de contaminante. En las condiciones actuales, consecuencia de una explosión demográfica, de un desarrollo industrial no programado y del afán de proporcionar "niveles de vida" más confortables a la población; la mayor parte de las megaciudades en todo el mundo, se han visto en serios problemas de contaminación.

De acuerdo al Acta de Prevención de Contaminación Ambiental de los principales países industrializados: El estado del medio ambiente contaminado se define como: "Una contaminación considerable del aire, agua y tierra, así como la proliferación de ruido, vibración física, hundimiento de la tierra y olores desagradables, los cuáles se derivan de operaciones comerciales modernas y otras actividades humanas".

En otras palabras, las causas (factores de destrucción del medio ambiente) provenientes de la vida humana y de operaciones industriales, traen como consecuencia efectos desfavorables.

La humanidad se encuentra expuesta cada vez más a los efectos de los contaminantes que le causan daños diversos, como intoxicaciones por sustancias químicas o alteraciones cromosómicas que se evidencian en las generaciones posteriores a través de malformaciones; siendo tales efectos directos y genéticos respectivamente. Entre los efectos indirectos que afectan al hombre, se podrían mencionar la alteración del clima local (microclima), decremento en la producción de alimentos, alteración del nivel de pureza del agua potable, incremento nocivo de residuos industriales en las aguas destinadas al riego y en general todo aquel contaminante que altere el clima mundial y la biosfera, entre otros.

1.1.- CONTAMINACION AMBIENTAL Y SUS EFECTOS.

CONTAMINACION DEL AGUA

El suministro de agua para una ciudad o zona urbana proviene usualmente de un lugar distante, pero sus aguas residuales ingresan en los cursos de agua cercanos. Si los depuradores del ecosistema acuático no pueden afrontar la cantidad de desechos, se contaminan las playas y fuentes de las zonas que están río abajo. La primera preocupación real por la contaminación del agua se produjo a fines del siglo XIX. La revolución industrial había estimulado el crecimiento de las ciudades, y la práctica común de arrojar el agua residual al curso de agua más próximo había convertido a muchos ríos en pozos negros. La mayor parte del agua potable de las ciudades se aspiraba de los mismos ríos, lo que causaba grandes epidemias de cólera, tifoidea y otras enfermedades.

El enfoque general de la contaminación del agua, hasta fines de la década de 1960, se caracterizó porque se insistía en la salud pública, pero sólo preocupaba la contaminación

local. Entonces se ignoró la debida a la industria. No se le dio importancia a que ríos y lagos eran los vaciaderos lógicos de cualquier desperdicio.

En cuanto a los océanos, aunque los hechos que mayor atención provocan sobre la opinión pública pueden ser explosiones de pozos petroleros o derrames de petróleo de buques, la contaminación de océanos por parte de los desechos industriales así como sistemas de alcantarillado que muchas veces no tienen tratamiento antes de ser vertidos al mar son de gran importancia.

La eliminación de desechos plásticos, que no son biodegradables, son causa de muerte o mutilación de criaturas marinas que quedan atrapadas en ellos o que ingieren estos objetos.

Otro grupo de contaminantes derivados de actividades humanas son los productos químicos tóxicos que contienen metales pesados como plomo y mercurio. Estos se acumulan en moluscos y peces que luego son consumidos por el hombre. Cuando la contaminación del agua comienza en lagos y ríos, termina afectando también el ecosistema marino en el momento que las vertientes llegan al océano.

Agua potable. La disponibilidad de agua potable limpia es un asunto cuya importancia será cada vez mayor hasta finales de este siglo. Este problema se agrava debido a varias actividades del hombre que contaminan a las pocas fuentes de agua fresca que quedan. El agua potable se contamina principalmente de dos maneras: por químicos peligrosos que atraviesan el suelo y pasan al agua subterránea o por materiales venenosos que pasan al agua después de que ésta ha salido del suelo. La mayor amenaza al agua subterránea viene de los pesticidas agrícolas.

Otras fuentes de contaminación del agua subterránea son las aguas residuales que se vierten a los ríos y lagos, los desechos de productos alimenticios y los tanques subterráneos de gasolina que dejan pasar al suelo productos del petróleo .

La contaminación del agua subterránea es muy difícil de remediar. Casi todas las soluciones son extremadamente costosas y en muchos casos, no totalmente factibles. Entre estas se encuentran; el bombeo de agentes de desintoxicación, llevar a la superficie el agua subterránea para tratarla y luego devolverla al acuífero; y encontrar nuevas fuentes de agua.

El tratamiento del agua subterránea en la superficie antes de ser usada es menos costoso pero la contaminación permanece en el acuífero. La contaminación del agua potable ocurre por lo general entre el momento en que el agua sale de la tierra y el momento en que llega a los grifos de las casas. Por ejemplo, aunque al salir de las plantas de tratamiento el agua por lo general no contiene plomo , la tubería de servicio, las instalaciones sanitarias y algunos accesorios de bronce pueden dejar filtrar el plomo al agua que sale del grifo.

Los efectos del envenenamiento por plomo han sido bien documentados. En los niños, por ejemplo, produce deterioro de la inteligencia y reduce la duración de los períodos de atención. Aún los intentos por limpiar el agua potable pueden tener efectos peligrosos. Los

científicos han descubierto que el cloro utilizado para la desinfección reacciona con los materiales orgánicos en el agua (hojas en descomposición, etc.) y forma cientos de sustancias más pequeñas, algunas veces cancerígenas, tales como el cloroformo.

A continuación se mencionan los principales contaminantes del agua:

Agentes biológicos: Esta categoría incluye organismos causantes de infecciones que son transportados a la superficie y al fondo de las aguas residuales de casas habitación, de instituciones y por cierto tipo de industrias como empacadoras de carnes, ingenios, plantas de curtido y productoras de papel.

Muchos de estos desperdicios son destruidos por bacterias en presencia de suficiente oxígeno, el cual es básico para la vida acuática, por lo que se deben controlar los desperdicios que requieren oxígeno o los peces mueren.

Sedimentos: Son arenas, minerales y partículas transportadas de la tierra, del aire o de las zonas pavimentadas al agua. Por ejemplo los proyectos de construcción producen grandes cantidades de sedimento. Esto provoca que se tengan que efectuar dragados en canales, ríos y puertos. Dañan además, turbinas eléctricas y equipo de bombeo, reducen la población marina además de disminuir la cantidad de luz solar que penetra en el agua, lo que provoca que el fitoplancton no produzca el oxígeno necesario para mantener en equilibrio el agua.

Sustancias químicas inorgánicas y minerales: Entre estas aparecen sales metálicas, ácidos y materias sólidas entre otras. Estas sustancias llegan al agua a partir de procesos industriales, de la minería de operaciones en campos petroleros, de prácticas agrícolas y de algunas fuentes naturales.

Sustancias orgánicas sintéticas: Entre estas aparecen, detergentes y otros auxiliares para el hogar, los pesticidas y los desperdicios de éstos en su manufactura. Los nutrientes, principalmente compuestos de nitrógeno y fósforo son necesarios en pequeñas cantidades como alimento a los vegetales acuáticos, pero en cantidades excesivas producen sobre fertilización, que puede ocasionar excesiva cantidad de algas (crecimiento vegetal) y mortandad de peces.

Sustancias radioactivas: La contaminación radiactiva en el agua proviene de la extracción y procesamiento de minerales radiactivos, de materiales radiactivos refinados utilizados en reactores nucleares.

Contaminación Térmica: Se origina en procesos de generación de energía eléctrica, ya sea por vía hidroeléctrica, de combustible fósil o nuclear. Los efectos de esta contaminación producen variaciones en la densidad y viscosidad del agua y sirven como acelerador en las reacciones de los contaminantes químicos.

CONTAMINACIÓN DEL SUELO

La contaminación del suelo tiene mucho que ver con el uso que se le dé a este, por ejemplo en el valle de México se han perdido tres cuartas partes de bosques naturales, mientras que un 70% del suelo se encuentra en una etapa avanzada de degradación. Se estima que cada año se desforestan más de mil hectáreas y se pierde otro tanto de tierras productivas. Estos fenómenos han afectado la productividad natural del territorio, la diversidad biológica y la permanencia de procesos ecológicos e hidrológicos vitales.

La deforestación, la eliminación de cuerpos de agua y el decaimiento de prácticas agropecuarias han propiciado que los suelos deshidratados y desprovistos de una cubierta vegetal permanente estén sujetos a la acción erosiva del viento, generando tolvaneras y emisiones de partículas en suspensión. La influencia sobre la contaminación del aire alcanza proporciones importantes.

Un problema mayor en cuanto al suelo es el persistente fecalismo al aire libre, la inadecuada disposición de residuos sólidos en tiraderos a cielo abierto y otras prácticas que, de acuerdo con evidencias preliminares, favorecen la dispersión de contaminantes aerobiológicos.

También en procesos agrícolas en donde se usan pesticidas se propicia una contaminación importante al suelo. Estos contaminantes, al mezclarse con agua de lluvia se filtran hacia mantos acuíferos profundos, contaminando así, el agua.

Al igual que en el caso del agua, el suelo se puede contaminar con sustancias químicas tóxicas así como de desechos radioactivos.

RADIATIVIDAD

La contaminación radiactiva es el aumento de la radiación natural ocasionado por la utilización que ha hecho el hombre de sustancias radiactivas naturales o producidas artificialmente. El efecto de la radiactividad sobre los organismos se hace sentir desde las estructuras orgánicas de la célula, a las cuales altera por los cambios químicos que producen material de alta energía, hasta el hombre. En ocasiones sólo se presentan mutaciones que no son siempre malignas. Una exposición a 600R (R= Roentgen.- Unidad de dosis de radiación que equivale a la irradiación necesaria para que los iones producidos en un centímetro cúbico de aire seco transporten una cantidad de electricidad igual a tres diez mil millonésimas de Coulomb) durante un mes seguramente provocará la muerte a un ser humano; a 425 R mueren el 50% de un grupo y se lesiona seriamente al resto.

La radiación puede ocasionar tumores malignos, calvicie, esterilidad, cataratas y lesiones medulares en los huesos. Las fuentes radiactivas artificiales más importantes, generadoras de radiaciones ionizantes, son las máquinas y el material radiactivo que se emplean en mayor número cada día. Los aparatos de rayos X, de uso en medicina, industria, comercio e investigación, son fuentes potenciales de exposición.

Los dispositivos industriales incluyen unidades radiográficas y fluoroscópicas para localizar defectos estructurales en fierro, soldaduras y fundiciones y para detectar cuerpos extraños.

Los aceleradores de partículas como pueden ser los ciclotrones, sincrotrones, betatrónes y generadores de Van de Graaff, son productores de radiaciones ionizantes.

RUIDO

Se denomina ruido a cualquier percepción auditiva exógena que causa en el individuo un estado de tensión. El ruido puede ser desagradable o dañar la salud, puede interferir en la comunicación, el aprendizaje, el desempeño de una actividad, el descanso, el sueño y hasta en la recuperación de la salud.

Las consecuencias del ruido, que son tanto de orden fisiológico como psicofisiológico, afectan cada vez más a mayor número de personas.

La intensidad de un ruido se expresa en unidades de tipo logarítmicas llamadas decibeles (dB). La escala logarítmica se extiende desde 0 a 140-160 dB. Un decibel es lo mínimo que puede captar un oído humano, el ruido que se encuentran por encima de 85 a 90 decibeles se considera peligroso.

Ruidos Ambientales Típicos:

Nivel de Decibeles	Designación
0-10	audible
10-30	muy suave
30-50	suave
50-75	moderadamente fuerte
75-100	muy fuerte
100-160	desagradablemente fuerte

1.2.-CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y SUS EFECTOS.

En las últimas décadas, el desarrollo urbano y el crecimiento de la industrialización ha provocado problemas de contaminación del aire en algunos países entre ellos México. Un factor es la explosión demográfica. Tanto el incremento de la urbanización como el continuo crecimiento de megaciudades han generado desperdicios que contaminan el aire y el agua y degradan los recursos renovables. Además de que los procesos industriales generalmente se concentran en las ciudades, las emisiones de vehículos y la combustión de fuentes estacionarias son las principales fuentes de contaminación del aire en estas ciudades.

El comportamiento físico-químico de los principales contaminantes del aire como son: CO, NO_x, SO_x, plomo, partículas suspendidas, hidrocarburos, oxidantes fotoquímicos y ozono, desempeñan un papel crucial en la contaminación atmosférica.

Las sustancias emitidas se dispersan en el aire, donde pueden interactuar químicamente entre sí con los componentes naturales de la atmósfera y con los materiales de la superficie.

A través de estos procesos determinados por la naturaleza química de los contaminantes y por la influencia de condiciones meteorológicas, tales como la intensidad de la radiación solar, la atmósfera puede depurarse, pero también dar origen a contaminantes secundarios o de segunda generación.

La atmósfera terrestre está compuesta principalmente de nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂) y argón (Ar). La concentración de vapor de agua (H₂O) es altamente variable, especialmente cerca de la superficie donde puede variar de casi 0% en volumen hasta 4% en los trópicos.

Existen también muchos otros pequeños constituyentes, tales como el neón (Ne), helio (He), kriptón (Kr), y xenón (Xe) que son gases inertes, y otros como el bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), hidrógeno (H₂), óxido nitroso (NO), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y bióxido de azufre que juegan un papel importante en procesos radiactivos y biológicos. Además de los componentes gaseosos, la atmósfera contiene partículas sólidas y líquidas.

Los aerosoles son partículas con diámetros generalmente menores de 1 mm y son creadas por reacciones de gas-a-partícula o son transportadas desde la superficie por el viento. Una porción de éstos aerosoles se pueden convertir en centros de condensación o depósito para el crecimiento de nubes de agua y hielo.

Una de las propiedades más importantes de nuestra atmósfera es la gran cantidad de moléculas de oxígeno libre en presencia de gases como nitrógeno, metano, vapor de agua, hidrógeno y otros que son altamente oxidantes. El desequilibrio químico de la tierra se mantiene por una fuente continua de gases reactivos derivados de procesos biológicos. Por lo tanto, la vida es fundamental para mantener la composición actual de la atmósfera.

La masa total de la atmósfera de la tierra es de aproximadamente 5.8×10^{15} ton. La distribución de la masa gaseosa se mantiene gracias a un balance que existe entre la fuerza de gravedad y la fuerza proveniente del gradiente de presiones. Este balance se conoce como balance hidrostático o ley barométrica.

Debido a esto, se presentan presiones descendentes en la atmósfera a medida que se hace un recorrido vertical hacia arriba. La presión horizontal promedio a nivel del mar se sabe que es de 1013.25 milibar.

PRESION mb (Pa)	ALTURA mi (km)	TEMP. APROX. ° F (°C)	CAPAS DE TEMPERATURA	CAPAS DE LA ATMOSFERA
	36000 (60000)			
10 ⁻⁸ (10 ⁻⁶)	360 (600) 180 (300)	2200 (1200)	Termósfera	HETEROSFERA
0.01 (10)	53 (85)	-150 (-100)	← Mesopausa → mesósfera	
1 (100)	30 (50)	32 (0)	← estratopausa → estratósfera	HOMOSFERA
250 (25,000)	7 (11)	-60 (-50)	← tropopausa →	
100 (100,000)	0	(68) 20	tropósfera	

Tabla 1.1 Capas de la atmósfera.

La composición de la atmósfera por debajo de 100 km en altitud es muy uniforme. A esta región se le conoce como homósfera distinguiéndola de la heterósfera por encima de 100 km. en donde las cantidades de sus constituyentes principales varían con respecto a la altura.

En la homósfera se llevan a cabo diversos movimientos atmosféricos con una trayectoria libre para moléculas lo suficientemente corta como para mantener una composición uniforme. Por encima del límite entre la homósfera y la heterósfera la trayectoria libre para moléculas se vuelve mucho mayor, permitiendo que la gravedad separe a las moléculas pesadas de las más ligeras. La trayectoria libre para moléculas es la distancia promedio que viajará una molécula sin que se encuentre con otra (choque con otra).

La concentración de ozono en la atmósfera terrestre es aproximadamente de 3 partes en 10 millones por volumen y no excede 10 partes en un millón, el flujo de masa de ozono es igual al del oxígeno. Tomando en cuenta la reactividad química así como la abundancia molecular, el ozono es un indicador primario de la estabilidad de la atmósfera.

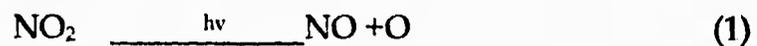
Por ésta razón existe gran preocupación por la pérdida de ozono en la estratósfera. Además de la pérdida de ozono en la estratósfera, existe evidencia de que las concentraciones de ozono en el hemisferio norte de la troposfera incrementan

constantemente. El ozono (O₃) en la tropósfera es un contaminante secundario, se forma a través de una reacción fotoquímica compleja que requiere de hidrocarburos reactivos, bióxido de nitrógeno (NO₂) y luz solar. Este incremento de ozono se debe casi seguramente a emisiones de hidrocarburos, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno creadas en procesos de combustión de muchos tipos, pero principalmente de motores de combustión interna y al uso de biomasa. Esto se puede controlar solamente al reducir concentraciones de hidrocarburos o de bióxido de nitrógeno en el aire. El óxido nítrico (NO) y el bióxido de nitrógeno son contaminantes primarios, conocidos como No_x. En la atmósfera, el NO se convierte gradualmente en NO₂.

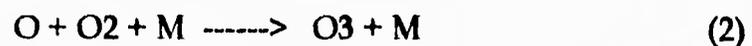
El incremento en la concentración de ozono en la tropósfera compensa la pérdida del mismo en la estratósfera con respecto a la incidencia de rayos ultra violeta (UV) sobre la superficie terrestre. Sin embargo, esto incrementa los daños a la vegetación y a los seres vivos, además de que al existir cambios en concentraciones de ozono en la atmósfera pueden influir en el perfil vertical de temperaturas.

Formación de ozono en la tropósfera.

Todo el ozono en la atmósfera se forma fotoquímicamente. En la estratósfera se forma debido a la fotólisis del oxígeno por medio de ondas cortas de rayos UV (< 242 nm), y parte se transfiere a la tropósfera. El ozono en la tropósfera, además se forma por medio de la fotólisis del bióxido de nitrógeno por medio de ondas mayores.



λ < 400 nm



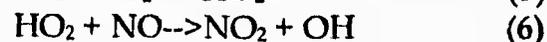
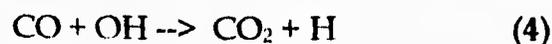
El ozono que se forma en la Ecuación 2 reacciona rápidamente con el NO formado en la ecuación 1:



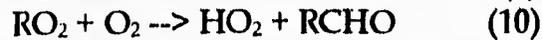
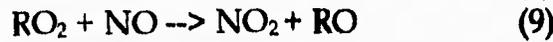
En ausencia de otros gases, esto resulta en un equilibrio fotoquímico:

$$[\text{O}_3] = j_1[\text{NO}_2] / k_3[\text{NO}] \quad (\text{A})$$

Para que se forme ozono, es necesario que el NO se oxide a NO₂ sin consumir ozono. Esto involucra peroxi radicales, tales como HO₂ y RO₂, formados en la oxidación de muchos hidrocarburos y monóxido de carbono por hidroxilo radicales.



y



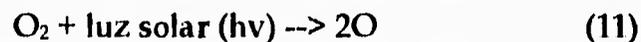
Las ecuaciones 6 y 9 satisfacen el balance en la expresión A y provocan la formación de ozono. Además la ecuación 6 también lleva a la reformación de hidroxilo - radicales, que posteriormente pueden oxidar CO e hidrocarburos en una reacción en cadena.

Disminución de ozono en la estratósfera.

La capa de ozono estratosférica filtra la radiación ultravioleta (UV) que entra en las regiones del espectro biológicamente activas. Esta "sombra" de ozono es la que hizo posible las formas de vida como las conocemos sobre esta tierra y una disminución de la capa de ozono se puede considerar como una amenaza para estas mismas formas de vida.

La consecuencia posible de la disminución es, por consiguiente lo suficientemente seria para justificar el estudio intensivo de las amenazas potenciales y para aconsejar precaución con respecto a las emisiones del aire que podrían estar contribuyendo a la disminución.

El ozono se forma como consecuencia de la interacción de la radiación UV que procede del sol con el oxígeno para formar oxígeno atómico (O).



Esta reacción continúa con otras dos, las cuales simplemente interconvierten a las especies fuertemente oxidantes y el ozono (O₃) sin pérdida.



El ozono se destruye posteriormente mediante la reacción del oxígeno atómico y el ozono:



La concentración de ozono, en ausencia de algunas otras reacciones, es un resultado de un equilibrio entre formación y destrucción. Se ha encontrado que la ecuación (14) es insuficiente para explicar las concentraciones de ozono que se observan y las reacciones posteriores de destrucción que se habían postulado; la más importante de éstas es la reacción con el radical hidróxilo OH y las especies peroxihidróxilo relacionadas (HO₂), las cuales ya se han observado como reacciones que desempeñan un papel importante en la formación del smog fotoquímico.



Esta es una pérdida de un ozono y un oxígeno atómico, sin pérdida alguna de el reactivo OH.

La otra reacción de importancia para la destrucción de ozono incluye óxidos de nitrógeno, los cuales se forman de manera natural en la estratósfera como resultado del óxido nitroso (N_2O) químicamente inerte que se libera del suelo y se difunde de la estratósfera, donde fotoquímicamente se convierte en el óxido nítrico más reactivo.



El óxido nítrico reacciona con O_3 de un modo análogo al OH; una pérdida de dos especies oxidantes sin pérdida de reactante:



Las ecuaciones (11) a (19) son suficientes, con base en el conocimiento actual, para explicar la concentración de ozono que se observa en la estratósfera. Las concentraciones de ozono son muy variables, más o menos 25% en una ubicación particular en un día específico, lo cual deja un elemento de incertidumbre que se ha considerado para todos los factores relevantes. Esta incertidumbre se debe reflejar en las consideraciones de cómo las actividades del hombre pueden causar la disminución del ozono estratosférico.

Las tres áreas importantes donde la actividad humana puede influir sobre el ciclo de ozono son: la emisión directa de óxidos de nitrógeno por el transporte supersónico que se realiza sobre la tropopausa, la generación adicional de óxido nitroso como resultado del uso cada vez mayor de fertilizantes nitrogenados y la formación de cloro atómico en la estratósfera a partir de los clorofluorometanos liberados en la tropósfera.

Hay ciertas pruebas de que las concentraciones cada vez mayores de óxido nítrico en la estratósfera procedentes de las primeras dos fuentes pueden no ser una amenaza tan seria como se consideró primero.

Se ha encontrado que la vía de destrucción estratosférica del óxido nítrico tiene un orden de magnitud más rápido de lo que una vez se pensó.



Las concentraciones aumentadas de NO, guían como resultado de esta reacción a un decremento en las especies de peroxihidróxilo HO_2 en favor del OH. El HO_2 es un destructor de ozono más importante que el OH o el NO_2 y es posible, como resultado,

que una concentración aumentada de NO pueda efectivamente resultar en un incremento de las concentraciones de ozono.

El vapor de agua que procede de transportes supersónicos podría, de hecho, ser de interés más serio porque es la fuente de especies OH/OH₂ en la estratósfera.

Los clorofluorometanos se utilizan como propulsores y refrigerantes de aerosol porque son inertes, y debido a que son inertes sobreviven en la atmósfera y se transportan hacia la estratósfera, donde fotoquímicamente se disocian para formar cloro atómico (Cl). Estos átomos de cloro destruyen al ozono sin la pérdida de las especies reactantes de la misma manera que lo hacen el OH y el NO.

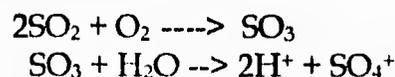


El efecto de una disminución del orden del 15% del ozono total, (valor estimado por la Organización Meteorológica Mundial para condiciones de estado estacionario, basado sobre una liberación continua de clorofluorometanos a los niveles de 1977), podría traer como consecuencia un incremento de radiaciones UV sobre la superficie de la tierra, que según algunas estimaciones, produciría un incremento del 30% en los tipos de cáncer de la piel no fatales aunque la exposición a la luz solar se relaciona fuertemente con el estilo de vida. Se considera que en algunas partes de Europa y Norte América ha habido un incremento del 200% en los tipos de cáncer asociados con UV en los últimos treinta años, presumiblemente asociado con el estilo de vida.

La lluvia ácida.

La creciente acidez en aguas y suelos naturales se ha vuelto un problema sobre extensas regiones del mundo, en particular en el noreste de América y el noroeste de Europa.; esta acidez se asocia con el transporte y la posterior deposición de bióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y sus productos ácidos de oxidación.

Normalmente las gotas de agua de lluvia deberían tener un pH de 7, sin embargo, al disolverse en las gotas de agua el bióxido de carbono atmosférico se propicia que el valor del pH baje a niveles cercanos a 5.6, debido a la formación de ácido carbónico. Se han detectado concentraciones ácidas de 10 a 10,000 veces mayores que las que se pueden esperar de fuentes naturales. Estos bajos valores se deben a la transformación del SO₂ y el NO_x en ácidos, al ser absorbidos por el agua de las nubes y las gotas de lluvia. Una reacción típica podría ser:



Estos aerosoles ácidos se depositan luego en cantidades significativas sobre la superficie del suelo y de las masas de agua, a lo que se conoce como lluvia ácida.

El aumento de estos ácidos se debe principalmente a emisiones de SO₂ y NO_x, a causa de consumos mayores de combustibles fósiles en los países industrializados.

Según datos de la parte oriental de Estados Unidos, entre un 60 y un 70% de la acidez de lluvia se debe al ácido sulfúrico y del 30 al 40% se debe al ácido nítrico.

Una alta proporción de derivados del ácido nítrico indica que las fuentes móviles son responsables, mientras que una alta proporción de derivados del ácido sulfúrico sugiere que son fuentes estacionarias. Por lo general las concentraciones de estos ácidos son bajas, pero con el problema de que las concentraciones son acumulativas.

Existen varios efectos de la lluvia ácida que son inquietantes. Primero, existe una acidificación de las fuentes naturales de agua. Esto puede tener un efecto devastador sobre la vida de los peces. La trucha y el salmón son especialmente sensibles a un pH bajo. La reproducción de muchos peces se detiene ante un pH con un valor menor de 5.5. También se ha observado una disminución en el plancton y la fauna del fondo, lo que reduce el suministro de alimento de los peces. En segundo lugar, tiene lugar una lixiviación de los nutrientes del suelo. Esta desmineralización puede llegar a una pérdida de productividad de las cosechas y los bosques, o un cambio en la vegetación natural.

La vegetación misma puede verse directamente dañada, y se observa un aumento en la corrosión de los materiales. La severidad del daño a las tierras y las extensiones de agua está parcialmente determinada por los minerales en el terreno de una región determinada. Aquellas áreas que contienen rocas como carbonato de calcio o minerales similares se ven protegidas por los mismos contra el ataque de la lluvia ácida. En dichas regiones, los lagos tienden a mantener el pH más cerca de 5 o 6.

Como no es posible alterar los resultados de la lluvia ácida una vez que haya tenido lugar en una región, la única solución es el control de las emisiones en la fuente. Cada vez resulta más evidente la necesidad de controlar el SO_2 y el NO_x , para impedir asimismo la dispersión del amplio rango de los contaminantes. El problema de la contaminación se debe analizar desde un ámbito internacional, ya que en éste caso, por ejemplo las emisiones de un país afectan a algunos otros.

Efecto invernadero

La tierra vista como un sistema termodinámico en equilibrio, libera aproximadamente la misma cantidad de calor (radiación) al espacio, que la que absorbe del sol. Esto se puede ver en la figura 1.1, que muestra que los $240\text{W}/\text{m}^2$ de radiación solar absorbida por la superficie terrestre, se balancea en promedio, con la radiación terrestre emitida al espacio a través de la última capa de la atmósfera.

Un cuerpo negro que radia esta cantidad de energía se encontraría a una temperatura cercana a -18°C , la temperatura efectiva del planeta.

Por otro lado, la superficie terrestre se encuentra en promedio unos 33°C más caliente que esta temperatura, y se implica que irradia cerca de $390\text{W}/\text{m}^2$. La causa principal para el calentamiento de la superficie es que la radiación emitida por la superficie no escapa totalmente libremente al espacio, pero se absorbe casi totalmente tanto por los

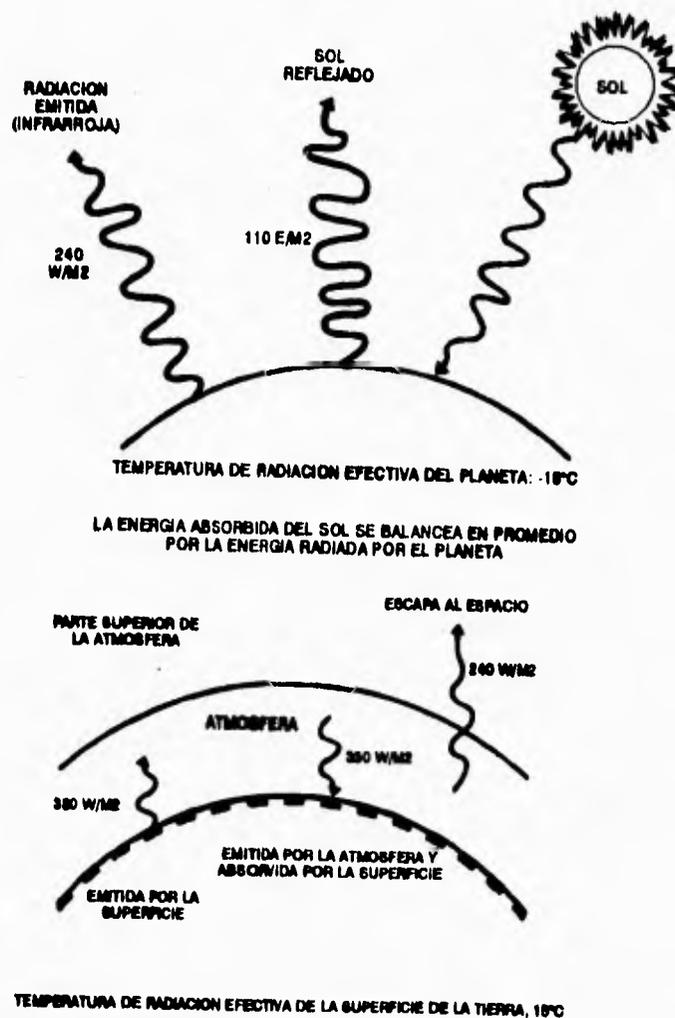
gases invernadero como por las nubes en la atmósfera, las que a su vez irradian una fracción substancial de energía de nuevo a la tierra. Por lo tanto, la superficie no puede enfriarse por sí misma eficientemente por radiación debido a los gases invernadero que están presentes en la atmósfera.

Esto se ilustra en la figura 1.1, que nos muestra que la energía que se absorbe en la atmósfera es de hecho, cerca de 150 W/m^2 .

El efecto de los gases invernadero en la atmósfera es mantener la superficie terrestre a unos 30°C más caliente de lo que sería sin estos gases.

El vapor de agua y las nubes constituyen el factor más importante de gases invernadero, aproximadamente 80% de los efectos invernadero. La actuación de las nubes es especialmente complicada, debido a que éstas reflejan la mayor parte de la luz solar al espacio. Es claro que los cambios en la distribución del vapor de agua y de nubes pueden alterar significativamente los estados energéticos mostrados en la figura siguiente.

Figura 1.1



Con respecto al problema del cambio climático debido a efectos invernadero, se puede decir que la temperatura aumenta debido a las modificaciones directas en la radiación debidas a concentraciones en aumento de gases invernadero, las concentraciones de vapor de agua, también aumentarán de algún modo, amplificando las modificaciones por medio de un mecanismo de retroalimentación positivo.

De cualquier modo, se sabe que las concentraciones de ciertos gases invernadero radiactivos aumentan en nuestra atmósfera, y a pesar de que su efecto invernadero cuenta aproximadamente un 20%, se puede determinar su impacto directo sobre el clima futuro.

Desde la revolución industrial (mediados del siglo 18) la combustión de combustibles fósiles y la deforestación han llevado a un incremento en las emisiones de bióxido de carbono. Desde entonces las concentraciones de bióxido de carbono en la atmósfera han aumentado grandemente, especialmente en las pasadas décadas.

Gases Invernadero influenciados por Actividades Humanas:

	CO ₂	Metano	CFC-11	CFC-12	N ₂ O
Concentración atmosférica	ppmv	ppmv	pptv	pptv	ppbv
Pre-Industrial (1750-1800)	280	0.8	0	0	288
Actualmente(1990)	353	1.72	280	484	310
Cambio/año	1.8 (0.5%)	0.015 (0.9%)	9.5 (4%)	17 (4%)	0.8 (0.25%)
Vida en atmósfera (años)	(50-200)	10	65	130	150

ppmv = partes por millón en volumen

ppbv = partes por billón en volumen

pptv = partes por trillón (millón de millones) en volumen

Las concentraciones de metano, después de haber permanecido relativamente constantes hasta el siglo 18, actualmente se han incrementado notablemente, debido a actividades del ser humano.

Las concentraciones de N₂O se han incrementado desde mediados del siglo 18, especialmente en las últimas décadas. Los CFCs no se encontraban presentes en la atmósfera antes de 1930.

Las concentraciones de bióxido de carbono en la atmósfera se afectan por tres procesos antropogénicos: descarga de CO₂ de la combustión de combustibles fósiles, cambios en el uso de suelo tales como la deforestación, y descarga de CO₂ de industrias cementeras.

Estimación de emisiones actuales de CO₂ provenientes de:

Combustión de combustibles fósiles	5.2 Pg C *	Marland et al. (1988)
Deforestación tropical	0.7 Pg C *	Houghton (1988)
Fabricación de cemento	0.1 Pg C *	Marland et al. (1988)
*. Pg C (Petagramos de carbón - 1×10^{12} gr).		

Debido a estas alteraciones en la composición de la atmósfera se pueden tener cambios climáticos tanto en la temperatura global, como en el nivel de los océanos.

Los rangos de resultados del estudio de modelos varían entre 1.9 y 5.2 °C. Aunque la mayor parte de los estudios conllevan a un resultado cercano a 4.0 °C.

En cuanto al incremento del nivel de los océanos se tienen los siguientes datos:

Promedio del aumento en el nivel del mar en el próximo siglo: 6 cm/década
Rango de imprecisión: 3 - 10 cm / década
Aumento pronosticado: 20 cm para el 2030
65 cm para el fin del próximo siglo.

En conclusión, podemos decir que la contaminación del aire puede ser considerada como un reflejo del nivel económico y cultural de la sociedad en cuestión, por eso dependiendo del nivel de desarrollo de esta la combatirá, sin embargo el desarrollo de la humanidad no hubiera sido posible sin el uso de fuentes de energía apropiadas, por una serie de características técnicas y económicas, la humanidad se basó en la explotación de los hidrocarburos sin considerar que los efectos producidos pueden afectar al medio ambiente de manera irreversible, debido a la cantidad de contaminantes, tipo y toxicidad, generando un potencial de contaminantes secundarios¹, afectando en consecuencia a la salud humana, animal y vegetal del planeta.

¹. -Por ejemplo la formación del Ozono se debe a la presencia de contaminantes primarios como los óxidos de nitrógeno e hidrocarburos en una atmósfera que mediante sus mecanismos de depuración, dan origen al ozono atmosférico.

2.-DESCRIPCION DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFERICOS EN LA ZMCM Y SUS EFECTOS EN LA SALUD

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se encuentra a 2240 m sobre el nivel del mar, con una extensión de 7,860 Km² rodeada por montañas. La población existente es de por lo menos 20 millones de personas, con 2.7 millones de vehículos y 30,000 industrias que operan dentro de la zona. La velocidad y la dirección de los vientos, la temperatura, la lluvia y las frecuentes inversiones térmicas influyen en la dispersión de los contaminantes.

DEFINICION DE CONTAMINACION DEL AIRE.

La naturaleza de toda contaminación esta determinada por la creciente explosión demográfica, que combinada con la tendencia a tener un mejor "nivel de vida", ha llevado a aumentar todo tipo de producción industrial y de transporte, generando en consecuencia la concentración de contaminantes del aire en áreas urbanas.

La contaminación del aire es la presencia en la atmósfera exterior de uno o más contaminantes o sus combinaciones, en cantidades tales y con tal duración que puedan afectar o interferir en la vida humana, animal, vegetal y al ejercicio de sus actividades.

2.1.- PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL AIRE.

Los contaminantes del aire son muy variados, pero los más importantes para evaluar la calidad del aire son los siguientes:

- Partículas suspendidas totales.
- Plomo.
- Monóxido de carbono.
- Oxidos de azufre.
- Oxidos de nitrógeno.
- Hidrocarburos.
- Ozono y otros oxidantes fotoquímicos.

Para tener una mejor comprensión de los contaminantes del aire podemos clasificarlos en contaminantes primarios y secundarios. Los contaminantes primarios son los emitidos directamente por las fuentes, mientras que los secundarios son aquellos que se forman mediante una serie de reacciones químicas de los contaminantes primarios con especies químicas bajo ciertas condiciones en la atmósfera, como es la formación del ozono.

PARTICULAS SUSPENDIDAS TOTALES.

Del total de la masa de contaminantes del aire se estima que el 10% corresponde a las partículas suspendidas totales (P S T) y este porcentaje dependerá de los siguientes aspectos:

- Tamaño de partícula.
- Condiciones meteorológicas.
- Composición física y química de las partículas.
- Tiempo de vida media en suspensión.

Las PST están constituidas por diversas sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, las primeras se componen principalmente de restos orgánicos de suelos ,esporas y virus. Las partículas inorgánicas provienen en su mayoría de la combustión en fuentes fijas y móviles, así como de los procesos industriales. Por lo que respecta a las partículas provenientes de la combustión, estas se encuentran integradas por partículas atomizadas y cenizas. Todas las PST están permanentemente en un ciclo en el cual son dispersadas y depositadas constantemente dependiendo de las propiedades sedimentables de las partículas y de las condiciones meteorológicas para un tiempo determinado.

La actividad de las PST en procesos fotoquímicos es poco significativa pero no así en los de formación de niebla y núcleos de condensación que influyen en la formación de nubes, precipitación pluvial y nieve en períodos de tiempo más cortos que lo normal y en temporadas o épocas no correspondientes a estos temporales.

Las PST se pueden clasificar en base a su tamaño, ya que de eso depende su potencial probable de inhalación , toxicidad y promedio de vida media en suspensión, la cual puede ser desde unos segundos hasta varios meses. Las partículas menores de 2.5 micras representan las de mayor inhalación por el sistema respiratorio humano y por tanto las más dañinas para la salud con un promedio de vida en suspensión considerable. Las partículas en el rango de 2.5 a 10 micras todavía se sedimentan a velocidades muy lentas por lo que son inhaladas fácilmente y tienen un alto potencial tóxico debido a que provienen de combustibles fósiles o contaminantes primarios.

PLOMO.

El plomo se puede encontrar en el aire en forma sólida formando parte de las partículas suspendidas, este proviene principalmente de los aditivos plomados que contiene la gasolina como es el tetraetilo de plomo y en segundo orden de la fundición de metales no ferrosos y de la fabricación de acumuladores, así como también de la soldadura, pintura y cerámica. México se presenta como el decimosegundo lugar productor de plomo en todo el mundo y la ZMCM contribuye con un 50% de este total.

La ZMCM tiene como fuentes emisoras principales de este contaminante a :

1-La gasolina, que a pesar de que se ha reducido el contenido de plomo en una de sus presentaciones como lo es la gasolina magna sin, el consumo en los vehículos automotores

es cada vez mayor, aumentando los niveles de plomo en el medio ambiente alarmantemente.

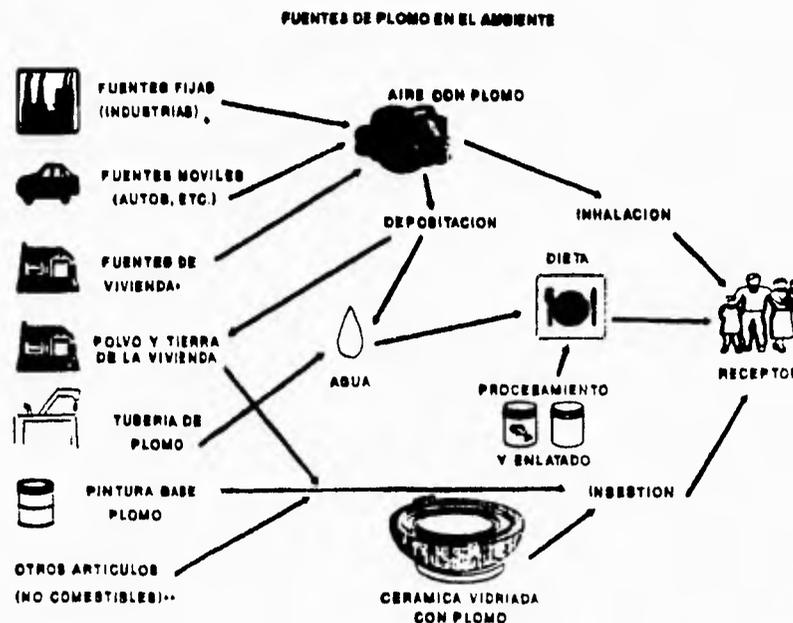
2-La cerámica vidriada y cocida a baja temperatura.

3-Pintura de cromatos (fabricada a base de plomo).

4-La soldadura con plomo para diversas aplicaciones.

Las fuentes emisoras de plomo al ambiente se muestran en la figura 2.1

Figura 2.1



MONOXIDO DE CARBONO.

El CO es un subproducto de la combustión incompleta, es incoloro e inodoro, y representa el más abundante y más distribuido de todos los contaminantes del aire emitidos por el hombre, por ejemplo se estima que las emisiones globales anuales promedio son de 350 millones de toneladas de las cuales 20% es producto del hombre.

Se sabe que el monóxido de carbono es muy estable y tiene una vida media en la atmósfera de 2 a 4 meses, lo cual representa un potencial tóxico constante en el aire urbano.

En toda máquina de combustión interna (móviles o fija), la dinámica de proporción del aire empleado como comburente de la mezcla con el combustible, y la misma operación de otros sistemas, impiden la oxidación completa del combustible, por lo que se produce el CO junto con los siguientes productos:

- mezcla de combustible no quemado.
- hidrocarburos de menor orden producidos en flama.
- bióxido de carbono (CO₂).
- agua (H₂O).

Existen también otros impedimentos de tipo técnico que influyen en las emisiones de CO como son:

- El diseño adecuado de las cámaras de combustión.
- Tiempo de ignición.
- Tipo de combustible.
- Diseño del carburador y sistemas de inyección de combustible.

Los niveles de monóxido de carbono a nivel mundial no han tenido cambios significativos debido a los mecanismos naturales depuradores que explican esta pérdida aparente de CO y que son principalmente:

- Reacción con radicales hidroxilo para formar bióxido de carbono (CO₂).
- Remoción por los microorganismos del suelo (hongos).

Quizá uno de los aspectos más peligrosos y de mayor impacto para la salud humana es el potencial tóxico que tiene el CO, debido a la afinidad que tiene la hemoglobina de la sangre por el monóxido de carbono es 200 veces mayor que por el oxígeno que lleva la propia sangre, y como se ha cuantificado que el 75 % de la contaminación atmosférica en la ZMCM corresponde al CO, se debe tener en consideración este aspecto, ya que además las concentraciones máximas se registran cerca de la población como son los ejes de circulación vehicular y los centros industrializados.

OXIDOS DE AZUFRE.

Los óxidos de azufre (SO_x) se presentan como el segundo contaminante del aire por el hombre en forma global (primero se tiene el CO) y su principal fuente se produce en la combustión de combustibles fósiles. En combinación con las partículas suspendidas provocan los efectos más perjudiciales de la contaminación atmosférica, ya que algunas partículas suspendidas de tamaño menor a las 2.5 micras adsorven SO_x y estos llegan hasta las regiones más críticas del sistema respiratorio humano.

Las clases de SO_x más presentes en el aire son el SO₂ y el SO₃. El primero que parcialmente se transforma en SO₃ es un gas incoloro, no flamable y proviene principalmente de la combustión, tanto del azufre inorgánico y orgánico de los combustibles, como también de algunos procesos industriales como son: la refinación del petróleo y procesos de transformación del plomo y zinc. Otra fuente importante secundaria en la formación del SO₂ se debe a la emisión de ácido sulfhídrico (H₂S).

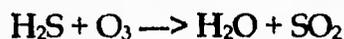
También se conoce que el SO₂ es de los gases que más rápidamente se oxidan produciendo ácido sulfúrico (H₂SO₄) y sulfatos, y cerca de las fuentes emisoras (hasta 20 Km.) se alcanzan concentraciones críticas.

Entre los principales problemas causados por los SO_x tenemos:

- 1.- Disminución de visibilidad.
- 2.- Partículas respirables que tienen efectos severos en la salud.
- 3.- Provocan aglomeración de otros gases y partículas.
- 4.- Producción de lluvia ácida como resultado de la producción de ácido sulfúrico por el SO₂ y una serie de reacciones químicas de compuestos fotoquímicos.

REACCIONES IMPORTANTES DONDE SE PRODUCE E INTERVIENE EL SO₂.

1- Producción de SO₂ como contaminante secundario formado por la emisión de ácido sulfhídrico producido en procesos de decaimiento biológico y procesos industriales al reaccionar con el ozono existente en el ambiente.



2- Producción de lluvia ácida por la formación de ácido sulfúrico a base de SO₂, radical oxhidrilo y una molécula aceptora de energía cualquiera (esto en un medio acuoso).



Donde:

- OH = Radical oxhídrido
- SO₂ = Bióxido de azufre
- E = Cualquier molécula aceptora de energía
- HOSO₂ = Radical HOSO₂
- H₂O = Agua
- H₂SO₄ = Acido sulfúrico

OXIDOS DE NITROGENO.

De los siete tipos de óxidos de nitrógeno presentes en el aire solo 3 se consideran como contaminantes del aire de manera potencial y son el N₂O, NO y NO₂. El N₂O (óxido nitroso) tiene un ciclo estable que es independiente de los otros óxidos y es un gas inerte con características anestésicas; en el ambiente suele presentarse en concentraciones muy bajas menores a los 0.5 ppm no produciendo ningún efecto adverso a la salud.

El NO (óxido nítrico) es un gas incoloro y su control tiene una gran importancia, debido a que este provoca la formación de NO₂ y el nebluno fotoquímico que a su vez provoca reacciones secundarias que producen ozono.

El NO₂ (bióxido de nitrógeno) es un gas pardo rojizo y no se considera como un contaminante primario a menos que este se encuentre en concentraciones muy elevadas como suele suceder en las emisiones de fuentes fijas producto de la combustión.

El 90% de todos los NO_x producidos por el hombre se generan en procesos de combustión de combustibles fósiles de los cuales el 50% proviene de las fuentes fijas.

De la producción total de NO_x en la combustión se sabe que un 10% del total corresponde a la formación de NO_2 y el 90% restante a NO .

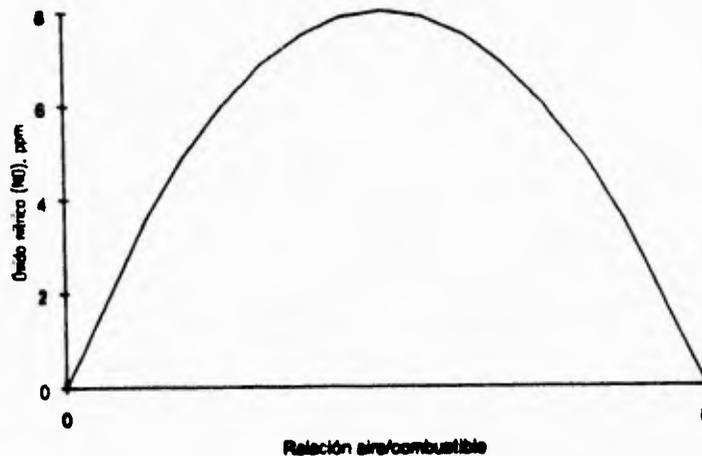
La formación de NO_x es de dos tipos durante la combustión:

- 1.- NO_x Térmicos.
- 2.- NO_x del Combustible.

Los primeros son debidos a la oxidación del nitrógeno atmosférico que interviene en la combustión y los segundos por la oxidación de los nitrógenos orgánicos contenidos en el combustible.

Los NO_x Térmicos se incrementan con la temperatura durante la combustión y como resultado de esta dependencia, la producción de NO_x esta en función de la relación aire-combustible (A/C), de manera que bajo condiciones ricas en combustible los niveles de oxígeno y de temperatura disminuyen considerablemente y por lo tanto la emisión de NO_x y a medida que la relación aire combustible aumenta se llega un valor crítico en el que se alcanza una temperatura máxima y la producción de NO_x también se incrementa al máximo, si a partir de este momento, sigue en aumento la relación aire combustible (A/C) entonces debido al exceso de aire se reduce la temperatura de flama y la producción de NO_x también, como lo podemos observar en la gráfica 2.1

Gráfica 2.1 Efecto de la relación aire combustible Vs. cinética del óxido nítrico.



También dependiendo del tipo de combustible la formación de NO_x debido al nitrógeno orgánico puede ser significativa como veremos en el capítulo 5, entre algunas de las consecuencias generadas por los NO_x tenemos :

- 1.- Formación de ozono atmosférico y otros oxidantes fotoquímicos (actuando como contaminante primario) en cantidades y duración importante para mantener graves efectos locales y regionales.
- 2.- Generación de partículas respirables como los nitratos.
- 3.- Los NO_x son precursores de ácidos y de la lluvia ácida (ácido nítrico, pernítrico, nitroso.)

4.- Producen problemas de visibilidad, y su comportamiento es parecido al del ozono que aumenta sus concentraciones en las primeras horas del día y disminuye al anochecer (por efecto de la radiación solar).

Cerca de las fuentes de emisión, la concentración de NO_x es mucho más elevada que los valores ambientales promedio, por lo que la contaminación del aire por los NO_x inicialmente es un caso de contaminación local, por ejemplo se sabe que en un boiler doméstico se registran hasta 10 ppm y en una caldera industrial de 500 a 1000 ppm rebasando los valores normales que existen en el ambiente y los de las normas ambientales.

Las reacciones de formación de ácidos por los óxidos de nitrógeno más importantes son las siguientes:



DONDE: OH= Radical oxhídrido
NO= Monóxido de nitrógeno
M= Cualquier molécula receptora de energía
HONO= Acido nitroso
NO₂= Bióxido de nitrógeno
HNO₃= Acido nítrico
HO₂= Radical HO₂
HO₂NO₂= Acido pernitríco

HIDROCARBUROS (HC)

La mayoría de los hidrocarburos existentes en la atmósfera, incluyen los no quemados y otras especies formadas durante la combustión, así como compuestos orgánicos volátiles derivados de la fabricación, almacenamiento y aplicación de solventes y pinturas.

Otras cantidades importantes de hidrocarburos emitidos son las derivadas de los procesos de manufactura química, refinación del petróleo y operación metalúrgica.

Dentro de las emisiones de hidrocarburos es importante considerar que el metano (CH₄) no es un contaminante en virtud de que no es tóxico ni reactivo en condiciones atmosféricas normales, aun cuando su concentración en áreas urbanas es cinco veces mayor que la suma de los hidrocarburos restantes.

La principal razón por la cual se considera a los hidrocarburos como contaminantes, es que son precursores de los oxidantes fotoquímicos del smog urbano, y en términos de su reactividad atmosférica los podemos clasificar en las categorías de baja reactividad, reactividad moderada, alta reactividad. Esta clasificación es importante debido a que se puede identificar el potencial contaminante de los hidrocarburos en las emisiones industriales de procesos y de sustancias cuyo control es prioritario para la aplicación de modelado de la fotoquímica atmosférica.

OXIDANTES FOTOQUIMICOS (OZONO)

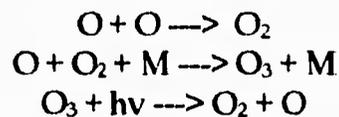
Todos los oxidantes fotoquímicos son contaminantes secundarios, formados a través de una serie de reacciones químicas catalizadas por la radiación solar a partir de los contaminantes primarios, que son en su mayoría NO_x , hidrocarburos y otros compuestos. El ozono (O_3) es el más abundante en las atmósferas urbanas debido a las grandes cantidades de NO_x que son emitidos y en menor medida los demás oxidantes fotoquímicos, como son los peroxiacetilnitratos (PAN) y los peróxidos de hidrógeno (H_2O_2). Una de las formas en que se presentan estos contaminantes es lo que se llama el nebluno fotoquímico o smog característico de las áreas urbanas, debido a la interacción de la luz solar con una variedad de contaminantes fotoquímicos, los cuales tienen una serie de efectos en la salud humana, animal y vegetal del planeta así como severos efectos en materiales y disminución de la visibilidad.

Existen 2 mecanismos de formación de ozono, el primero que se forma en la estratosfera debido al ciclo que se inicia a más de 80 km de altitud, con la disociación del oxígeno molecular (O_2) en oxígeno monoatómico debido a la radiación solar.



donde: h = constante de Planck ν = Frecuencia asociada a un fotón

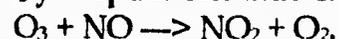
Este ciclo continua en una región caracterizada por una serie de reacciones donde el oxígeno monoatómico, el molecular y el ozono aparecen tanto en los reactivos como en los productos.



Obteniéndose como resultado final, una capa de ozono que se localiza entre los 16 y 32 km de altitud, con una concentración característica de 0.03 ppm, la que actúa como filtro protector para absorber las radiaciones ultravioleta provenientes del sol.

El segundo mecanismo de formación del ozono también se lleva a cabo como resultado de un proceso natural de depuración, debido a la reacción de los contaminantes del aire (principalmente NO_x en forma de NO_2) con el oxígeno monoatómico y molecular en las superficies terrestres de las áreas urbanas, mediante el ciclo fotolítico atmosférico del bióxido de nitrógeno.

Debido a que el bióxido de nitrógeno es altamente reactivo necesita poca energía (radiaciones por debajo de 0.38 micras) para disociarse en NO y O , para después formar ozono por la reacción $\text{O}_2 + \text{O} \longrightarrow \text{O}_3$ y después cerrando el ciclo por la reacción :



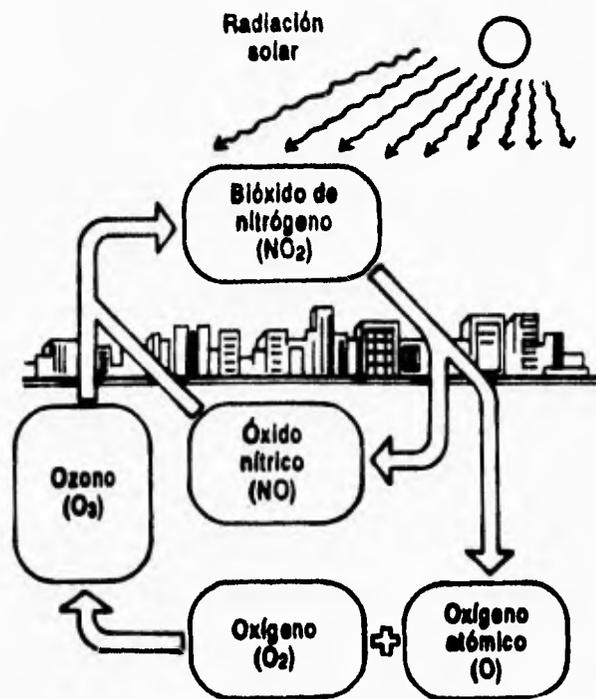
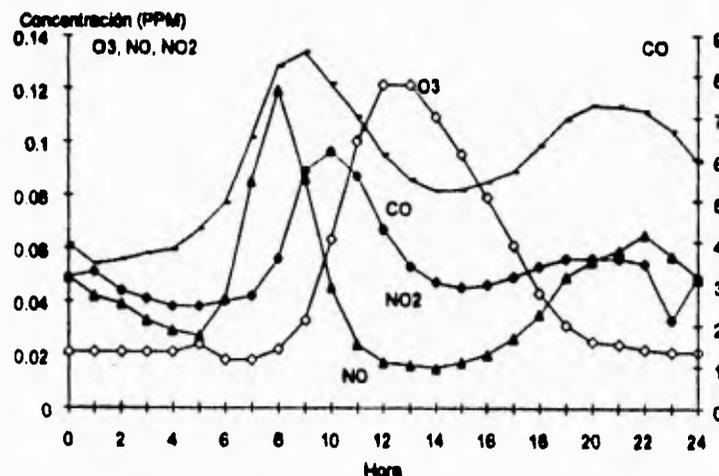


Figura 2.2 Ciclo fotoquímico atmosférico de los óxidos de nitrógeno.

Se sabe que las tres reacciones anteriores son muy rápidas y su combinación tiende a mantener un nivel constante de ozono en la atmósfera, y este nivel de ozono aumenta en proporción directa a la intensidad solar característica de los rangos horarios del día como lo indica la gráfica 2.2

Gráfica 2.2 Variación horaria del Ozono, NO_x , y CO .



Cabe mencionar que la naturaleza contribuye a la emisión de contaminantes al aire como son: CO_2 , SO_2 , NO_x , CO , etc. (como lo muestra la tabla 2.1) y que la misma naturaleza tiene sus propios mecanismos de depuración para estas emisiones, pero estos no son efectivos para controlar grandes acumulaciones de contaminantes locales y regionales a corto plazo, por lo que se convierte en una tarea imposible cuando se tienen casos locales de alta contaminación como en los centros urbanos.

Además de los contaminantes descritos hasta el momento, podemos agregar que las emisiones de bióxido de carbono y vapor de agua a la atmósfera a largo plazo, causan problemas globales al medio ambiente como se mencionó en el cap. 1.

TABLA 2.1 PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL AIRE

Contaminante	Fuentes importantes		Emisiones estimadas (tons)		Concentración Atmosférica de fondo	Tiempo de residencia atmosférica	Reacciones de eliminación y vertederos
	Hombre	Naturaleza	Hombre	Naturaleza			
SO ₂	Combustión del carbón y del petróleo	Volcanes	146*10 ⁶	Ninguna	0.2 ppb	4 días	Oxidación a sulfatos después de la absorción por aerosoles
H ₂ S	Procesos químicos tratamiento de aguas negras	Volcanes, acción biológica en zonas pantanosas	3*10 ⁶	100* ⁶	0.2 ppb	2 días	Oxidación a SO ₂
CO	Escapes de los vehículos y otros tipos de combustión	"Incendios de bosques", reacciones del terreno	274*10 ⁶	75*10 ⁶	0.1 ppm	3 días	Hongos del terreno, se necesita un gran sumidero
NO/NO ₂	Combustión	"Acción bacteriana en suelos"	53*10 ⁶	NO:430*10 ⁶ NO ₂ :658*10 ⁶	NO:0.2-2 ppb NO ₂ :0.5-4 ppb	5 días	Oxidación a nitratos después de absorción por aerosoles, reacciones Fotoquímicas
NH ₃	Tratamientos residuales	Descomposición biológica	4*10 ⁶	1160*10 ⁶	6-20 ppb	7 días	Formación sulfatos de amonio, oxidación a nitratos
CO ₂	Combustión, liberación de los océanos descomposición	Biológicas	1.4*10 ¹⁰	10 ¹²	320 ppm	2- 4 años	Absorción en los océanos o biológica
HCs	Combustión procesos químicos	Biológicas	88*10 ⁶	480*10 ⁶	CH ₄ :1.5 ppm	16 años	Reacciones fotoquímicas

De los contaminantes atmosféricos principales antes descritos, se realizará la descripción posterior de las tecnologías para su reducción de NO_x, SO_x y Partículas Suspendidas Totales ya que :

- 1.- Los HC no han demostrado efectos adversos directos sobre la salud humana².
- 2.- Más del 90 % de las emisiones de CO se llevan a cabo por las fuentes móviles.³
- 3.- Una de las principales fuentes de plomo en la actualidad, que es la gasolina, cuenta con tratamientos para disminuir su contenido y corresponde a las fuentes móviles.
- 4.- El control de los NO_x reduce también la formación de O₃.
- 5.- La disminución de NO_x y SO_x contribuyen a reducir las lluvias ácidas.

2.2.- PROBLEMAS EN LA SALUD DEBIDO A LA CONTAMINACION DEL AIRE.

Los efectos de los contaminantes son primordialmente detectados por las alteraciones en la salud humana, animal y vegetal en todo el mundo, debido a las emisiones de contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos al medio ambiente tanto en zonas urbanas como rurales.

Los efectos más representativos y que menos habían preocupado a lo largo del tiempo hasta hace unas décadas a las sociedades humanas modernas, son los provocados por las emisiones de gases procedentes de la combustión, tanto de fuentes fijas como móviles, debidas al propio desarrollo y necesidades de ésta, repercutiendo en todos los aspectos de la vida urbana actual del hombre.

Puede generalizarse que todo efecto en la salud debido a la contaminación del aire es causado por:

- × Tipo o tipos de contaminantes.
- × Cantidad (concentración de contaminantes).
- × Tiempo de exposición promedio ante contaminantes.
- × Frecuencia de exposición ante contaminantes.

Estos efectos además dependen de factores meteorológicos y geográficos de un cierto lugar como son:

- × Tipo de clima (humedad, temperatura, etc.).
- × Características de vientos (dirección y velocidad).
- × Orografía.
- × Altitud (presión atmosférica).

² Referencia, Contaminación del aire (Origen y control) K. Wark., pag. 53

³ Referencia, La ciudad de México (Contaminación atmosférica) Quadri pag. 117

La mayoría de los efectos a la salud provocados por los contaminantes del aire se registran en el sistema respiratorio, ya sean PST, NO_x, SO_x, HC, Pb, CO, CO₂, Ozono o la combinación de estos, pueden provocar en mayor o menor medida severas alteraciones, que van desde una simple irritación en la nariz, hasta una formación cancerígena en los pulmones y los efectos en las personas con algún problema respiratorio son mayores.

EFFECTOS DEL MONOXIDO DE CARBONO E HIDROCARBUROS.

Sus efectos en la salud humana son preocupantes debido a que tanto en la ZMCM como en cualquier ciudad que cuente con zonas industriales y/o alta densidad vehicular tiene a su población expuesta a altos niveles de CO, siendo este el contaminante más abundante en el aire y el más difícil de eliminar por la tecnología disponible actual.

Al ser inhalado se combina con la hemoglobina de la sangre produciendo carboxihemoglobina (COHB) debido a que el CO tiene más afinidad química para combinarse con la hemoglobina que con el oxígeno (200 veces más), reduciendo la capacidad de transportar oxígeno a los pulmones y al cerebro; afectando las funciones normales de los tejidos (hipoxia) y provocando sobrecarga en el corazón (efectos cardiovasculares), teniendo grandes consecuencias para aquellas personas que padecen de alguna enfermedad relacionada con estos síntomas.

Además se pueden presentar efectos neuro-conductuales, fibrinólisis y perinatales. La toxicidad del CO radica en que disminuye la capacidad de la hemoglobina para transportar oxígeno y aunque la vida media del CO en el cuerpo humano es de hora y media, el CO es capaz de combinarse reversiblemente con todo compuesto que tenga grupos hemo como la mioglobina de los músculos (disminuye la capacidad de los músculos).

Las funciones neuro conductuales disminuyen presentando los siguientes síntomas:

- × Disminución de la percepción visual.
- × Adormecimiento por falta de oxígeno en el cerebro (estado de vigilia).
- × Disminución del aprendizaje.
- × Disminución de la habilidad manual.

En cuanto los efectos perinatales, se sabe que los recién nacidos presentan disminución de peso y retraso en el desarrollo postnatal. Como ya se mencionó, el CO no se acumula fácilmente en el organismo, pero en elevadas y continuas concentraciones durante largos períodos puede causar intoxicación aguda, manifestándose con dolores de cabeza, mareos y en ocasiones llegando al estado de coma y la muerte por daños al sistema nervioso.

A concentraciones de CO mayores a 51 ppm⁴ en la atmósfera con exposiciones largas se generan 8.7 % de COHB provocando cambios estructurales en el corazón y en el cerebro.

⁴Se considera peligroso el CO a concentraciones de 13 ppm en un intervalo de 8 horas.

El mayor efecto producido por los hidrocarburos se presenta al combinarse con los NO_x , ya que conforman al smog citadino (oxidantes fotoquímicos) por lo que sus efectos son parecidos a los del ozono.

Algunos hidrocarburos aromáticos como el hollín y los alquitranes pueden ser causantes de propiedades carcinogénicas, pero estudios de las concentraciones de hidrocarburos en el aire ambiental no han demostrado efectos directos en la salud del hombre.

PARTICULAS SUSPENDIDAS TOTALES (PST) Y PLOMO(PB)

De todas las partículas suspendidas totales que existen en el aire las más perjudiciales son aquellas que están entre las 200 y 0.5 micras, las cuales pueden penetrar en el aparato respiratorio (fracción respirable). Esta fracción respirable o inspirable se divide en las fracciones extratorácica (ET), traqueobronquial (TB) y pulmonar o alveolar (P).

Donde la primera de estas fracciones (ET) esta constituida por partículas que penetran y se depositan en la nariz, senos paranasales, faringe y en la laringe y sus tamaños van de las 5 hasta las 200 micras. La fracción traqueobronquial (TB) corresponde a partículas menores a 20 micras. Las partículas de fracción alveolar (P) corresponden a partículas menores a 10 micras y estas son capaces de llegar hasta los alvéolos en los pulmones.

Las PST son de muy variados materiales y compuestos como el plomo, los cuales provocan estados aun desconocidos de efectos potenciales en el cuerpo humano (acumulación en diversos organos).

El aumento en enfermedades respiratorias superiores como sinusitis y rinosinusitis es debido a la presencia de partículas grandes en suspensión en el aire de la ZMCM y es aceptado que provoca una reducción en el funcionamiento respiratorio de niños y personas de edad avanzada.

Estudios clínicos - epidemiológicos de los efectos de las PST, muestran que el potencial de la combinación de estas al absorberse con compuestos derivados de los SO_2 como son las partículas submicrónicas de ácido sulfúrico y sulfatos provoca broncoconstricción que provoca resistencia e irritación pulmonar y si se tienen exposiciones repetidas, los individuos muestran cambios fisiológicos y morfológicos.

Por otra parte se sabe que las PST de origen carbónico tienden a absorber sustancias orgánicas policíclicas como los benzopirenos los cuales provocan actividad mutagénica y carcinogénica jugando un papel importante en el cáncer broncogénico en las poblaciones urbanas.

OXIDOS DE AZUFRE (SO_x)

Los SO_x son quizá el más nocivo de los contaminantes del aire provocado por las emisiones industriales y de transporte. Generalmente se conoce su capacidad para inducir reacciones alérgicas, irritación en los ojos, en la piel y en el sistema respiratorio.

Se supone que los efectos al aspirar el SO₂ por la nariz son menores debido a su gran solubilidad en el agua, que lo disuelve rápidamente y le impiden penetrar hasta los alvéolos pulmonares, pero en personas mayores o con deficiencias respiratorias (asmáticos), se tiene una mayor susceptibilidad a dichos efectos por el hecho de inhalar mayor cantidad de aire por la boca.

Cuando se rebasan concentraciones de 5 ppm de SO₂ las personas presentan severas irritaciones en las vías respiratorias y en ocasiones los efectos pueden causar graves inflamaciones de la mucosa nasal, lesiones en las paredes de las vías respiratorias, descamación, rinitis y conjuntivitis.

En épocas de invierno las bajas temperaturas contribuyen a agravar los efectos del SO₂ y el más frecuente es el broncoespasmo. Cuando se tiene el mayor peligro para la salud, es cuando existe la posibilidad de formación de ácido sulfúrico al combinarse el SO₂ con compuestos que actúen como catalizadores y que al inhalarse en forma de partículas o aerosoles pueden penetrar fácilmente por las vías respiratorias hasta alcanzar los alvéolos disminuyendo altamente la capacidad pulmonar.

Investigaciones recientes con animales (ratas) expuestos a concentraciones de 9 a 50 ppm de SO₂ tuvieron como resultado cambios morfológicos y bronquitis crónica.

OXIDOS DE NITROGENO (NO_x).

Los óxidos de nitrógeno se generan en grandes cantidades en ciudades como el D.F. que tienen numerosas fuentes contaminantes como lo son los automóviles, la industria y en las centrales de generación de potencia como lo son las Termoeléctricas.

Por lo que respecta a los porcentajes de emisiones de NO_x que son derivadas de las fuentes móviles (automóviles) y fijas (emisiones de vapores de proceso y de la combustión) se estima que son iguales ya que cada una participa con el 50 %. Las emisiones de NO_x de la naturaleza son también significativas pero no son equivalentes a las magnitudes locales generadas por el hombre.

Los NO_x son precursores de el Ozono generado en la baja atmósfera por lo que es importante el conocimiento de este contaminantes ya que si bien no afecta a la salud directamente como NO_x a bajas concentraciones, la puede afectar en su forma de ozono en las horas críticas del nebluno o smog citadino.

Dentro de los principales efectos que los NO_x presentan en la salud y que han sido poco analizados en los diagnósticos médicos, es la formación de metahemoglobina que es parecida a la carboxihemoglobina (formada por el monóxido de carbono en combinación con la hemoglobina) y que también disminuye la capacidad de transportar oxígeno a la sangre y como consecuencia trae consigo una serie de complicaciones que derivan y se entremezclan con otros padecimientos comunes.

En México la norma aprobada actual es de 0.21 ppm promedio por hora, correspondiente a 100 IMECAS, la cual ha sido rebasada varias veces hasta en un 300 % que ha sido la medida registrada en los centros de monitoreo en la zona metropolitana, en la cual existen muchas zonas urbano-industriales las cuales están expuestas a exposiciones repetidas y elevadas en períodos cortos que contribuyen más a la toxicidad del NO₂ que a una dosis acumulada y los efectos como el incremento en la incidencia de las infecciones respiratorias y la disminución de la función pulmonar se pueden presentar en poblaciones expuestas a niveles menores que los estándares.

El bióxido de nitrógeno altera todos los mecanismos de defensa en los pulmones permitiendo mayor disponibilidad para las enfermedades (estos mecanismos son similares en todos los mamíferos).

EL NO₂ es percibido por el olfato desde concentraciones de 1 ppm, sin embargo en personas normales al inhalar 15 ppm durante una hora le pueden causar molestias torácicas y a 50 ppm dolores sub-esternales.

Cuando se tienen exposiciones de 50 ppm o más en períodos mínimos de 21 días aparecen síntomas de intoxicación aguda como debilitamiento progresivo, tos, dificultad para respirar, cianosis (coloración azul pálido por insuficiencia de oxigenación) y a las 300 ppm se producen cambios inflamatorios en los pulmones cuyos efectos son irreversibles y en todos estos casos se esta susceptible de contraer edema pulmonar y bronconeumonía.

En personas con padecimientos de asma a los 0.2 ppm le provocan severas disminuciones en todas sus funciones pulmonares.

Es adecuado seguir las recomendaciones de la Organización Mundial Salud, la cual exhibe que las exposiciones máximas deben ser de 0.07 a 0.17 ppm promedio en una hora y no debe ser más de una vez al mes.

OZONO (O₃)

La contaminación fotoquímica por oxidantes, mejor conocida como smog es realmente una mezcla compleja de compuestos gaseosos y aerosoles, de los que destaca principalmente el ozono (O₃) y en menor medida el bióxido de nitrógeno y los nitratos NO₃.

El ozono es el más representativo de los oxidantes debido a su alto porcentaje presente en la atmósfera urbana, también existen otros oxidantes como el nitrato de peroxiacetilo (PAN) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), así como otros subproductos, pero todos estos contaminantes son formados a partir de la acción de la energía ultravioleta del sol sobre los NO_x más otros compuestos o hidrocarburos como son los compuestos orgánicos ROG, emitidos a la atmósfera por el uso de los solventes, evaporación de algunos combustibles y de la misma combustión.

Los síntomas que presentan las poblaciones donde se han detectado altas concentraciones de ozono y oxidantes fotoquímicos son irritación ocular, irritación en la garganta y nariz, así resequead (irritación de la mucosa nasal y orofaringea), tos, dificultad y dolor durante la respiración profunda, dolor sub-esternal, malestar general, debilidad, náusea y dolor de cabeza.

En general las poblaciones expuestas a altas concentraciones de ozono también tienen una alta probabilidad de desarrollar enfermedades respiratorias crónicas, así como afectar a los grupos con mayor exposición como deportistas, individuos con obstrucción pulmonar, enfisema o fibrosis, así como asmáticos o fumadores.

Otro de los efectos considerables y que se presentan en exposiciones prolongadas son: fibrosis pulmonar peribronquiolar y centriacinal, aceleramiento de los procesos normales de envejecimiento, aumento del riesgo de cáncer cuando se tienen niveles elevados de O_3 con promedios de 10 ppm. La función respiratoria comienza a disminuir cuando se realizan actividades físicas al estar en presencia de concentraciones de ozono entre los 0.121 y las 0.20 ppm. presentando una recuperación después de la exposición.

Como se puede ver todos los contaminantes del aire tienen un mayor efecto en los sistemas del ser humano que están en contacto como son, el ocular, respiratorio y sistema nervioso, todos estos se ven afectados en mayor o menor medida dependiendo del tipo y grado de concentración del contaminante y su frecuencia de exposición a mediano y largo plazo.

PARTE II

CONTAMINACION EN LA ZMCM Y SU REGLAMENTACION

La presencia de la contaminación atmosférica es un problema a nivel mundial. Este se asienta gravemente en las principales ciudades y megaciudades, debido a los grandes volúmenes de contaminantes que se generan con el afán de satisfacer las crecientes "necesidades" de las civilizaciones modernas y por consecuencia un incremento en el consumo de los hidrocarburos (procesos de combustión).

México es uno de los países más industrializados en Latino América, con una población cercana a los 80 millones de habitantes y con una continua migración interna de las zonas rurales hacia los centros urbanos, provocando que más de dos terceras partes de los mexicanos ahora vivan en las principales ciudades del país. (ZMCM, Guadalajara y Monterrey)

Precisamente en la ZMCM que es una de las más contaminadas a nivel mundial debido a que se descargan en su atmósfera grandes cantidades de compuestos y partículas, los mecanismos de depuración locales no pueden ser efectivos para controlar esta contaminación, lo cual genera un gran problema para los ciudadanos.

El transporte, la concentración y crecimiento industrial así como la explosión demográfica son los tres problemas principales a resolver en la ZMCM y de ello depende la salud de aprox. 20 millones de personas en la presente década.

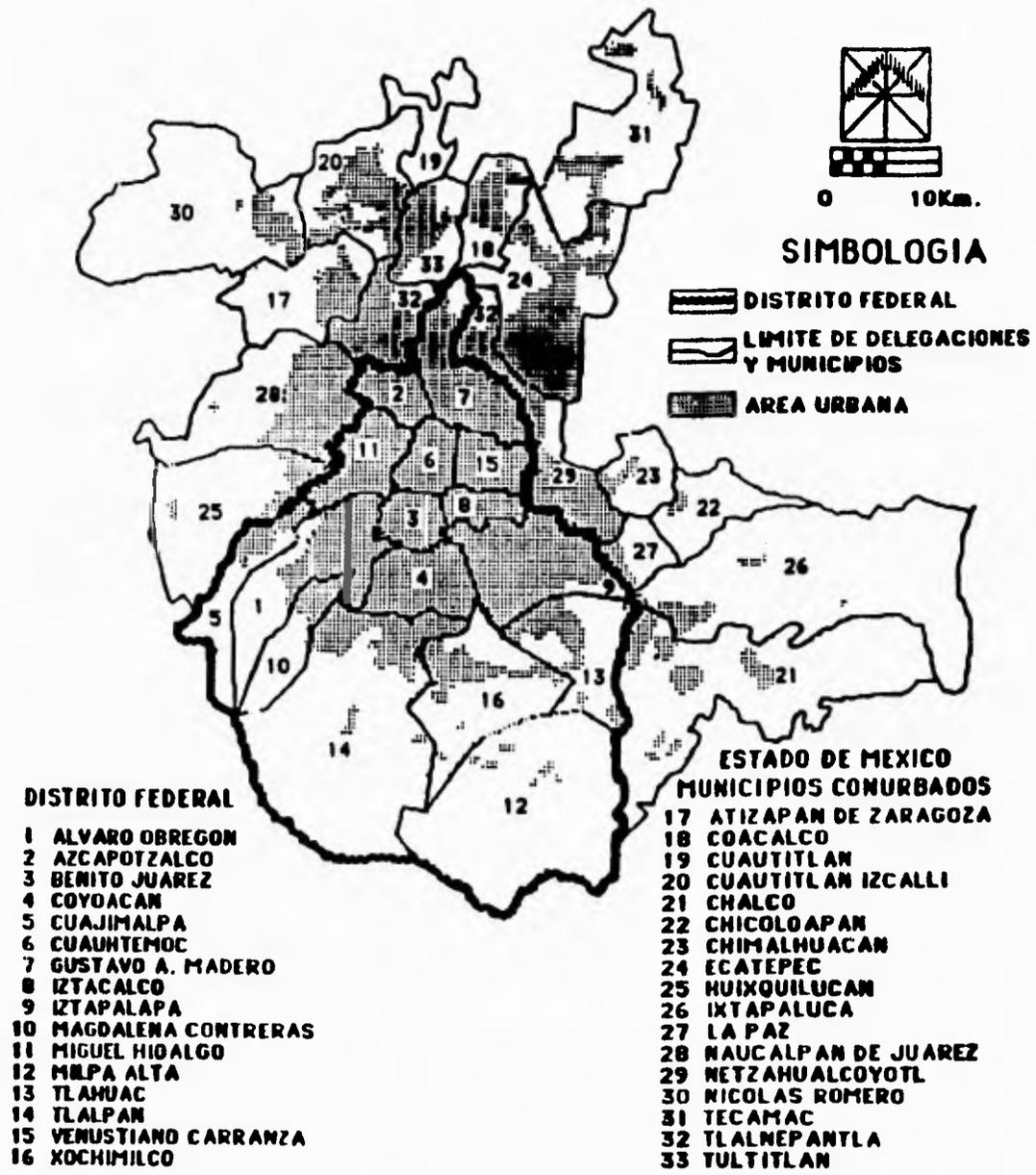
3.-MONITOREO Y EVOLUCION DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZMCM

3.1.- ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO (ZMCM).

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se encuentra localizada en una cuenca a 2240 m sobre el nivel del mar; está rodeada de montañas de hasta 5200 m de altura y su temperatura anual oscila entre 10 y 20 °C; la precipitación media anual es de 777 mm y se distribuye principalmente en los meses de mayo a octubre.

La ZMCM está conformada por 16 delegaciones del D.F. y 17 municipios conurbados del Estado de México. Su área abarca aproximadamente 2,110 km², en la que circulan cerca de tres millones de vehículos automotores y habitan alrededor de 21 millones de personas. La población en los últimos años se ha redistribuido, con una tendencia a moverse de las áreas centrales hacia las periféricas. Aunque la tasa de crecimiento se ha reducido, se calcula que para el año 2010 la población excederá los 25 millones.

La ZMCM constituye, además, un polo industrial resultante de la activa expansión de ese sector ocurrida a partir de la década de 1940 y acentuada en la década de 1970, lo cual ha dado lugar a que se asienten en el área alrededor de 30 mil industrias, aunque el crecimiento industrial tiende a disminuir.



3.1 ZMCM

La composición de las fábricas en la zona comprende: alimentos y bebidas (32%); maquinaria en general (21%); papel y celulosa (11%); textiles (15%); madera (7%); química y petroquímica (7%); cemento y cerámica (3%); metales (1%); y otras (3%).

En la ZMCM se consumen diariamente 44.37 millones de litros de combustibles.

El 24.6% de los combustibles se utiliza en la industria y los servicios, 9.2% en las termoeléctricas, 10.7% es para el consumo doméstico y el restante 55.5% lo consume el transporte (Figura 3.2).

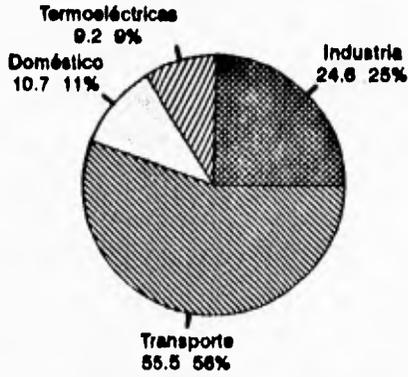
La distribución por tipo de combustible utilizado es la siguiente:
 Gasolina Nova (26.5%); Gas Natural (24.8%); Gas LP (19.9%); Diesel (4.4%); Diesel SIN (7.5%); Gasóleo (2.3%) y Magna SIN (14.5%) (Figura 3.3).

(El consumo total de combustibles equivale a 44.37 millones de litros diarios de gasolina).

Figura 3.2

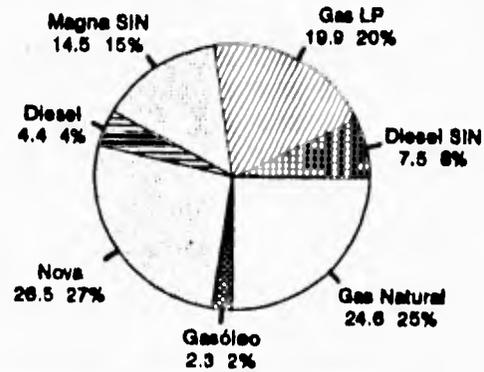
Figura 3.3⁵

CONSUMO DE COMBUSTIBLES POR SECTOR EN LA ZMCM
Promedio de Julio de 1993 a Junio de 1994



EL CONSUMO TOTAL DE ENERGIA EQUIVALE A 324,895 MILL. DE Kcal DIARIAMENTE

CONSUMO DE COMBUSTIBLES EN EL VALLE DE MEXICO
Promedio de Julio de 1993 a Junio de 1994



EL CONSUMO TOTAL DE COMBUSTIBLES EQUIVALE A 44.37 MILLONES DE LITROS DIARIOS DE GASOLINA

Tabla 3.1

Consumo de combustibles limpios en la ZMCM

COMBUSTIBLE	VOLUMEN
Gas Natural	312000000 pies ³ /día
Gas LP	60890 barriles/día
Gasolina Nova-Plus	87.2 MBPD*
Gasolina Magna-Sin	20.4 MBPD
Diesel	25.5 MBPD
Gasóleo Industrial	11.0 MBPD

* Millones de barriles de producción diaria.

Fuente. Gerencia de Protección Ambiental, Pemex.

LOS PRINCIPALES FACTORES DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA EN LA ZMCM.

El transporte, el anárquico crecimiento urbano y la concentración industrial son los tres factores más difíciles de resolver en la ZMCM y los que seguramente requerirán mayores recursos financieros para disminuir su impacto en el medio ambiente. En efecto, no se puede hablar del transporte particular o colectivo, de la industria y el aumento de la mancha urbana sin referirnos a la contaminación atmosférica que provoca.

⁵ Los datos de las gráficas 3.2 y 3.3 se obtuvieron del PICCA 1994

Son pues, diversas caras de un mismo fenómeno que urge resolver pues de ello depende la salud de más de 18 millones de mexicanos que respiran un aire contaminado por lo menos durante los próximos 10 años.

La contaminación generada por el transporte y la industria no es solamente preocupación del gobierno y del sector académico; también lo es de los ciudadanos, que todavía no encuentran canales adecuados para contribuir a evitar dicho problema, técnicamente complicado y costoso. Los esfuerzos gubernamentales en ese sentido no han sido suficientes. La carrera la sigue ganando la lógica concentradora de fuentes contaminantes: fábricas, comercio, basura y vehículos de combustión interna, por nombrar los más importantes. De éstos, la mayoría de los automóviles, cuya tecnología inadecuada y atrasada, son ahora la principal causa de la contaminación citadina.

La ciudad de México concentra las más importantes actividades económicas, políticas y culturales del país. Producto de una expansión urbana sin planeación, alberga la quinta parte de la población. La política del acelerado crecimiento industrial, fomentada a partir de la década de los cuarenta, no consideró los costos sociales ni las externalidades que implicaría su ejecución. En efecto, el crecimiento demográfico y físico, la concentración industrial y el incremento de vehículos automotores, provocaron varios desequilibrios; entre otros, un deterioro ambiental de considerable magnitud.

Las estimaciones realizadas revelan que entre 1985 y 1990, mientras el D.F. creció al 2.2% anual, los 17 municipios conurbados del Estado de México lo hicieron al 7.8%; y la ZMCM, en su conjunto, al 4.5%, cifra superior a la media nacional. En los últimos 10 años, más de 800 personas llegaron diariamente a la ciudad, atraídos por la expectativa de mejorar su situación económica y cultural. Esos inmigrantes, junto con el crecimiento natural, conforman hoy la metrópoli más poblada y más contaminada del mundo. Dicho fenómeno se gestó sin una tecnología ni una infraestructura urbana adecuadas, lo cual agravó aún más la irracional utilización de los recursos naturales de la región. La industria, principalmente asentada en la parte norte de la ciudad, y el crecimiento vehicular, contribuyeron al deterioro al emitir enormes concentraciones de contaminantes a la atmósfera.

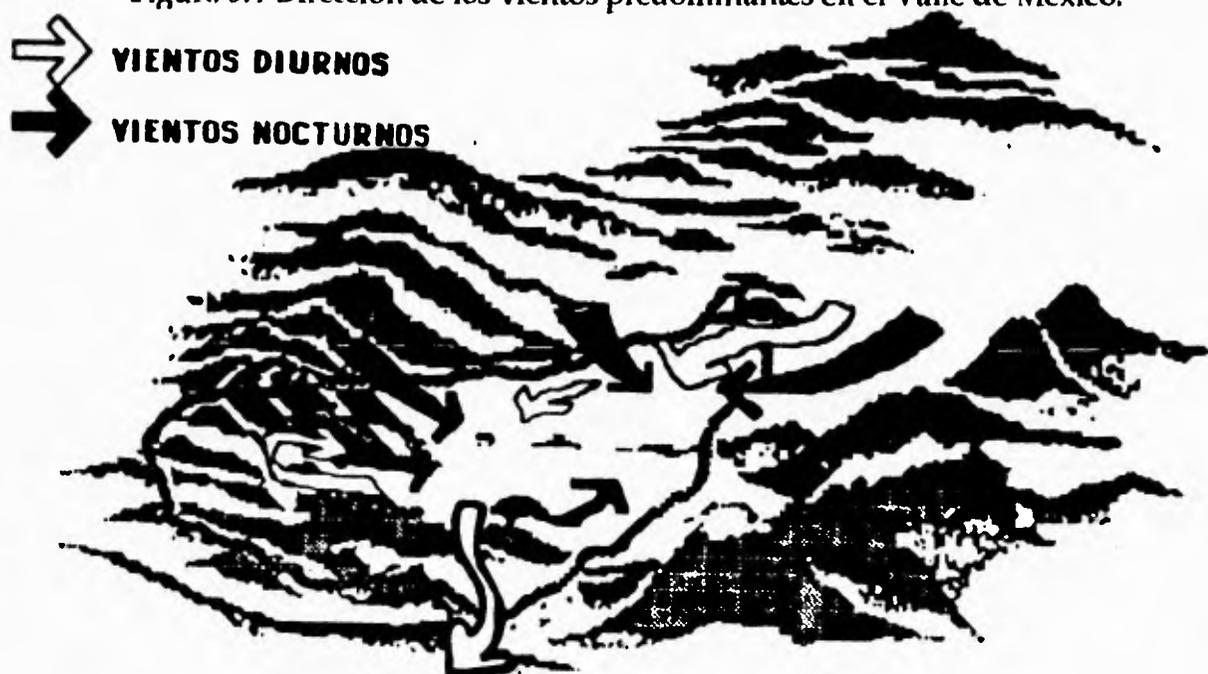
La ZMCM es la región geográfica que reúne en México la mayor cantidad de fuentes naturales y artificiales de contaminación: áreas erosionadas, basura y defecación a cielo abierto, filtraciones al subsuelo de aguas no tratadas, fábricas, talleres, termoeléctricas, industrias químicas, del cemento y de fertilizantes, fundidoras, baños públicos, incineradores industriales y domésticos, millones de vehículos automotores de combustión interna y aviones, por mencionar algunas. Según un estudio del D.D.F. todas esas fuentes emitieron a la atmósfera en 1990 alrededor de 11,000 toneladas de contaminantes al día, mundialmente la mayor cantidad en una ciudad. Cabe destacar que 5 mil industrias asentadas en la urbe son altamente contaminantes; y que sólo una cuarta parte de ellas cuenta con equipo anticontaminante, en muchos casos insuficiente o inoperante.

El aire levanta anualmente más de 300 mil toneladas de polvo en unas 22 mil hectáreas deforestadas. El crecimiento de la mancha urbana ha reducido drásticamente las áreas verdes naturales y provocado un cambio irreversible en la calidad ambiental. Las áreas verdes son indispensables para atenuar la contaminación pues evitan la erosión de la tierra y las variaciones bruscas de clima; además aumentan el oxígeno del aire. Sin embargo, en el DF existe un déficit considerable de ellas: apenas el 4.8% del área urbana es verde, cuando la cantidad mínima satisfactoria es del 20%; el promedio por habitante del DF es de sólo 2.3 m² y en la ZMCM de 5.2 m², cuando las normas internacionales lo fijan de 9 a 16 m².

Otra fuente de deterioro ecológico son los vehículos de combustión interna, principalmente el automóvil, que en menos de dos décadas se convirtió en la principal fuente de contaminación. En los años setenta se consideraba que no emitían más de la mitad de la contaminación, pero a partir de los ochentas pasaron a ocupar el lugar principal. Diagnósticos de diversas dependencias públicas realizados entre 1982 y 1994 les asignan del 75 al 85% del total de emisiones contaminantes.

Otro elemento que juega un importante papel en el problema general de la contaminación atmosférica son las condiciones geográficas de la ciudad. Por estar situada en un valle, la difusión de los contaminantes en la atmósfera es mínima cuando se reduce la intensidad de los vientos, como ocurrió en febrero, marzo y parte de abril de 1992. Durante casi 7 meses la zona mantiene un promedio de vientos de baja velocidad (menos de 1.5 m por segundo), que generalmente circulan de norte a sur y actúan como una verdadera escoba en la dispersión de contaminantes hacia el centro, el sureste y el suroeste de la ciudad. También influye la altitud, pues el bajo contenido de oxígeno provoca deficiencia en los procesos de combustión interna de los motores. Estudios de Petróleos Mexicanos indican que en el Valle de México un metro cúbico de aire contiene 212 gramos de oxígeno, mientras que al nivel del mar, encontramos 275 gramos; en paralelo, la eficiencia de combustión de un automóvil bien afinado es del 92%, mientras en el DF es de apenas 69%.

Figura 3.4 Dirección de los vientos predominantes en el Valle de México.



Por último, también el clima influye en la contaminación. Las bajas temperaturas provocan el fenómeno de inversión térmica que ocurre cuando la superficie de la tierra alcanza sus más bajos valores de enfriamiento, debido a que el aire que se encuentra cerca del suelo está más frío y, por lo tanto, es más pesado para poder ascender. Cuando el suelo recibe la fuerte radiación solar, alcanza temperaturas más altas que la del aire. Durante las últimas horas del día o las primeras de la noche, este calor vuelve a reflejarse hacia la atmósfera provocando el calentamiento de la masa de aire que está en contacto con el suelo. Tiende entonces a subir y ser reemplazada por una masa de aire más densa que se queda atrapada en la superficie. Esta no podrá ascender porque arriba de ella se encuentra la capa de aire caliente formando un verdadero tapón. Así, los contaminantes quedan atrapados en los primeros metros de la superficie.

La inversión térmica se rompe cuando los rayos del sol calientan nuevamente las capas de aire y la superficie del suelo produce turbulencias que provocan la dispersión de contaminantes.

En la ciudad se llegan a registrar anualmente alrededor de 180 días con inversión térmica.

Figura 3.5



3.2.- EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE (CRITERIOS DEL IMECA).

La calidad del aire de una cuenca atmosférica depende en todo momento de la emisión de contaminantes, del comportamiento fisicoquímico de éstos y de la dinámica meteorológica, que determinan su dispersión, transformación y remoción.

Los efectos de la contaminación atmosférica dependen a su vez de las concentraciones, la frecuencia y tiempo de exposición. En todo caso medir y analizar la calidad del aire es importante para:

- Definir las interacciones entre los distintos contaminantes y sus patrones de comportamiento e identificar acciones necesarias para su control.
- Determinar los efectos de la contaminación del aire sobre el hombre y su ambiente.
- Evaluar el cumplimiento de las normas de calidad del aire y constatar los avances logrados en la lucha contra la contaminación.

- Establecer y activar, en su caso, procedimientos de contingencia para prevenir episodios de contaminación del aire.
- Establecer criterios ambientales para la reordenación urbana y planeación regional.
- Identificar emisiones prioritarias y problemas específicos, y desarrollar estrategias de control.
- Informar a la población y propiciar su participación en la solución del problema.

El monitoreo del aire consta de dos procesos: el de muestreo y el análisis de contaminantes atmosféricos.

Para poder medir los niveles de los contaminantes criterio, es necesario contar con métodos que produzcan resultados comparables, es decir que sean específicos, sensibles, estables, precisos y exactos.

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

Los factores considerados para su confiabilidad son:

- Especificidad
- Sensibilidad y rango
- Estabilidad
- Precisión y exactitud
- Tiempo promedio de muestreo
- Facilidades y costos

Para el caso de monitoreo automático se debe considerar:

- Calibración y estabilidad del cero
- Tiempo de respuesta
- Temperatura ambiente y humedad

Para medir la calidad del aire ambiental o las emisiones puntuales de contaminantes, el método de medición se debe especificar de acuerdo a uno conocido como método de referencia o algún método equivalente.

El primer índice de calidad del aire aplicado en México a finales de los años 70's fue el denominado "Índice Mexicano de Calidad del Aire" (IMEXCA), y este fue una copia del índice PSI (Pollution Standard Index) de los Estados Unidos de Norte América.

De entre las fallas, se puede señalar la incongruencia en los puntos de quiebre de la función lineal del IMEXCA en comparación con los puntos respectivos del índice PSI, de tal forma que arbitrariamente se fijaron puntos de quiebre sin haber aplicado el conocimiento científico de los efectos esperados para una ciudad a 2240 metros sobre el nivel del mar y con condiciones geográfica bien definidas.

En la actualidad, en la ZMCM se emplea el *Índice Metropolitano de Calidad de Aire (IMECA)*. En 1982 la Secretaría de Salubridad y Asistencia expidió un acuerdo en el que se establecen "los lineamientos para determinar el criterio que servirá de base para evaluar la calidad del aire en un determinado momento".

En el artículo primero del mencionado acuerdo, aparecido el 29 de noviembre de 1982 en el Diario Oficial de la Federación, se establece el siguiente "criterio.. para evaluar la calidad del aire en un determinado momento":

- Para las **partículas totales en suspensión (PTS)**, un promedio de diario máximo de 275 microgramos por metro cúbico.
- Para el **bióxido de azufre (SO₂)**, un promedio diario máximo de 0.13 partes por millón.
- Para el **monóxido de carbono (CO)**, un promedio máximo de 13 partes por millón, promediado en un intervalo de ocho horas.
- Para el **ozono (O₃)**, un promedio horario máximo de 0.11 partes por millón.
- Para el **bióxido de nitrógeno (NO₂)**, un promedio horario máximo de 0.21 partes por millón.

Estos criterios fueron propuestos en 1976, en una reunión llevada a cabo en Atlihuetzia por un grupo de expertos de los sectores público, privado y social, quienes usaron el método DELPHI para calcular las concentraciones de contaminantes que debían ser utilizadas para determinar la calidad del aire. La propuesta del mencionado grupo fue más tarde aceptada por las autoridades de la extinta Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente. Además de estos criterios se consideran dos adicionales los cuales no son oficiales.

- Para las **partículas suspendidas menores a 10 µm (PM10)**, un promedio de diario máximo de 150 microgramos por metro cúbico.
- Para el **plomo (Pb)**, un promedio máximo de 1.5 microgramos por metro cúbico, promediado en un intervalo de 3 meses.

A continuación se anotan los pesos de cada uno de los factores considerados para establecer los valores máximos presentados.

Tabla 3.2

FACTORES CONSIDERADOS AL ESTABLECER LAS NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE PARA MEXICO.	
FACTOR	PESO (%)
Efectos detectados en la Salud	25.665
Calidad del aire en México	21.325
Normas de otros países	20.955
Facilidad técnico-económica de la reducción de emisiones	15.635
Efectos detectados en la vegetación	8.225
Efectos detectados en la visibilidad	8.195

Para determinar la cantidad de partículas suspendidas totales en la atmósfera se utiliza el método de referencia de grandes volúmenes (Hi-Vol) durante un periodo de 24 horas de muestreo. Este tipo de muestreador de grandes volúmenes utiliza un motor de aspersión de alto flujo (1.3 a 1.7 m³/min).

La concentración de las partículas suspendidas totales (mg/ m³) se calcula determinando el peso gravimétrico de la masa colectada y el volumen del aire muestreado.

Para determinar la cantidad de bióxido de azufre en la atmósfera (ppm), se utiliza el método de referencia de la pararosanilina . El bióxido de azufre en la muestra es absorbido en una solución de tetracloromercurato de potasio usando un burbujeador tipo. La absorbencia de la solución es medida espectrofotométricamente (Principio de detección: colorimétrico)

El método de referencia para la determinación del monóxido de carbono (ppm), se basa en el principio de la absorción de radiación infrarroja por el CO en un sistema fotométrico no dispersivo

Para determinar la cantidad de oxidantes fotoquímicos (ppm), el aire ambiente es introducido conjuntamente con etileno a una cámara de mezclado donde el ozono presente en el aire reacciona con el etileno en una reacción de químicoluminiscencia con la formación de un complejo excitado que emite luz que se detecta por medio de un tubo fotomultiplicador.

El método de referencia para la determinación del NO₂ (ppm), se basa en la reacción de químicoluminiscencia del óxido nítrico (NO) y ozono (O₃) en la cual se genera energía. El NO₂ es medido indirectamente reduciéndolo previamente a NO. Esta reducción se logra por el uso de un convertidor, mientras que la concentración de NO₂ se calcula mediante un procesador electrónico.

La calidad del aire se establece en base a los contaminantes que se encuentran con más frecuencia y a mayores concentraciones en el aire de los grandes centros urbanos e industriales y a los que se les denomina contaminantes "criterio"; para cada uno de ellos se determinan concentraciones límites permisibles o estándares. Así un "aire limpio o de alta calidad" será aquél en el cual las concentraciones de los contaminantes mencionados se encuentren por debajo de los valores de los estándares que se considera representan las concentraciones mínimas potencialmente dañinas para los grupos más sensibles de la población general.

Establecer límites permisibles para la concentración de los contaminantes atmosféricos implica transformar la información científico-técnica en un solo número, que expresa el juicio político-administrativo de cada país.

Como es bien conocido, la SEDESOL basa la información que ofrece sobre la contaminación en datos proporcionados por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA). La información es procesada cada hora durante todo el día, en base al criterio denominado **Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA)**, el cual describe numéricamente los niveles de contaminación. La determinación del IMECA se realiza a partir de promedios horarios ponderados por medio de los valores de referencia que se presentan a continuación. Un valor IMECA de 100 puntos corresponde a la norma para cada contaminante y un valor IMECA de 500 representa niveles de contaminación para los cuales existen evidencias de daños significativos a la salud, con base en referencias numéricas preestablecidas (puntos de quiebre) para criterios y concentraciones que se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3

IMECA	Calidad del aire	Contaminante y tiempo promedio					
		PST	PM10	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃
		(24h)	(24h)	(24h)	(1h)	(8h)	(1h)
		mg/m ³	mg/m ³	ppm	ppm	ppm	ppm
0-100	Satisfac.	275	150	0.13	0.21	13	0.11
101-200	Insatisfa.	546	350	0.35	0.66	22	0.23
201-300	Mala	637	420	0.56	1.10	31	0.35
301-500	Muy mala	1000	600	1.00	2.00	50	0.60

La mala calidad del aire durante el invierno, en particular en 1992, ha hecho urgente establecer algunas medidas consideradas en el Programa de Contingencias Ambientales. Entre ellas está la reducción o suspensión temporal de actividades en las principales industrias y establecimientos de servicios emisores de contaminantes y la ampliación del programa "un día sin auto" a dos días, en caso de llegar a la Fase II del Programa de Contingencias Ambientales.

Programa de Contingencias Ambientales.

Nivel 1

Condiciones.- 250-350 IMECA (Desfavorables a la dispersión)

Medidas.- Reducción de 30 a 40% de la actividad industrial, sobre todo en la de mayor potencial contaminante.

Suspensión de actividades al aire libre en escuelas primarias y secundarias, para evitar exposición innecesaria de los niños.

Suspensión de la circulación de 50% de vehículos de oficinas públicas (medida adicional prevista en el Programa Invernal).

Suspensión desde la madrugada y hasta las 12 horas del servicio de tintorerías, planchadurías, baños públicos, y la actividad en establecimientos donde apliquen solventes y pinturas.

Suspensión de actividades en las plantas de asfalto.

Nivel 2

Condiciones.- 351-450 IMECA (Desfavorables a la dispersión)

Medidas.-Reducción de 50 a 75% de la actividad en cerca de 1,500 industrias.

Suspensión de actividades en escuelas, oficinas públicas, cines, teatros, centros nocturnos, centros comerciales de bienes no comestibles y lugares de afluencia masiva.

Ampliación del programa "Hoy No Circula" a dos días.

Nivel 3

Condiciones.- 451 y más IMECA (Desfavorables a la dispersión)

Medidas.-Suspensión de todas las actividades potencialmente contaminantes.

3.3.- MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE (RED NACIONAL DE MONITOREO).

Para evaluar el impacto que los ordenamientos legales tiene en la calidad del aire y vigilar la concentración de los contaminantes atmosféricos que permitan dirigir y orientar las acciones de control se estableció la Red Nacional de Monitoreo.

La distribución de la Red Nacional de Monitoreo Atmosférico puede observarse en la tabla 3.4.

Tabla 3.4
RED NACIONAL DE MONITOREO ATMOSFERICO

Sistemas	Cobertura geográfica.	# actual estaciones por tipo de red			Inicio operación
		Manu al	Auto.	Micrometeorológ ica	
1	Aguascalientes	2			1990
2	Tijuana	10	1		1987
	Mexicali	4			1988
3	Saltillo	6			1982
	Monclova	8			1982
	Torreón	9			1987
4	Manzanillo	3			1990
5	Reforma, estación Juárez	4			1987
6	Chihuahua	11	2	4	1983
	Ciudad Juárez	13			1970
7	León, Celaya, Salamanca, Gto	4			1987
8	Pachuca, Tula, Tepéji, Tizayuca Apaxco, Ajacuba, Chinconcuac	11			1981
9	Guadalajara	26	7	3	1975
10	Toluca	8	7		1987
11	Cuernavaca	8			1982
12	Monterrey	13	5	3	1970
13	Tepic	3			1990
14	Puebla	8			1987
15	Querétaro	8			1984
16	San Luis Potosí	8			1985
17	Hermosillo	3			1989
18	Villahermosa, Cárdenas, Macuspana Benito J, Huimanguillo	10			1987
19	Tlaxcala	2			
20	Minatitlán, Coatzacoalcos	14			1987
21	Mérida	2			1991
22	ZMCM	25	32	11	1972

En el período 1991-1993 se operaron 24 redes de monitoreo atmosférico en diversas ciudades del país.

La mayoría de las estaciones son de tipo manual y determinan las concentraciones de partículas suspendidas totales (adicionalmente se determinan metales pesados) que al comparar los valores con los que establece el valor criterio antes descrito, se identifica que hay ciudades como Hermosillo, Son.; en donde este tipo de contaminante constituye un problema serio.

Por lo que respecta a la ZMCM en 1972 se instaló y puso en operación la Red Manual de Monitoreo Atmosférico y en 1986 la Red Automática, ambas conforman la Red Metropolitana de Calidad del Aire con 25 y 32 estaciones respectivamente.(Figura 3.5)

Como parte de la política de descentralización del gobierno federal, en 1992 fue transferida la Red Metropolitana de Calidad del Aire, del Instituto Nacional de Ecología (INE) (antes Subsecretaría de Ecología) a la Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental del Valle de México, instancia de carácter interinstitucional y actualmente presidida por el Departamento del Distrito Federal (DDF).

Dada la transferencia mencionada y que se pretende privatizar parte de la operación de la Red, se estableció un programa para el logro de este fin.

Los contaminantes del aire cuya concentración se determina a través de las redes de monitoreo, son los mismos medidos por redes similares en otros países: monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SO₂), bióxido de nitrógeno (NO₂), partículas suspendidas totales (PST) y ozono (O₃), que es un contaminante secundario generado por la reacción fotoquímica entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos principalmente.

Los niveles máximos permisibles fijados en los criterios ecológicos para cada uno de ellos, resumidos anteriormente tienen como objetivo proteger la salud de humanos, animales y plantas, los medios ambientales (agua, aire, suelo); patrimonios culturales y otros bienes materiales, así como establecer una base, a partir de la cual se pueda poner en práctica medidas de control.

En relación con el plomo, no se ha establecido un criterio ecológico oficialmente en México.

Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico

Caseta	Nombre	Zona	SO2	O3	CO	NO2	NOX	H2S	HCNM	PST	PM-10	MET	Aldehído	Total
Red Automática de Monitoreo Atmosférico														
1-Z	Lagunilla	C		X	X									2
2-E	Vallejo	NO	X											1
3-S	Santa Ursula	SO	X											1
4-B	Tacuba	NO	X	X	X	X	X	X				X		7
5-G	ENEP-Acatlán	NO	X	X	X	X	X					X		6
6-M	Los Laureles	NE	X											1
7-H	La Presa	NE	X							X				2
8-J	La Villa	NE	X								X			2
9-N	San Agustín	NE	X	X		X	X					X		5
10-C	Azcapotzalco	NO	X	X										2
11-E	Tlalnepantla	NO	X	X	X	X	X	X		X	X	X		9
12-L	Xalostoc	NE	X	X	X	X	X			X	X	X		8
13-X	Merced	C	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		10
14-T	Pedregal	SO	X	X	X	X	X		X	X	X	X		9
15-Q	Cerro de la Estrella	SE	X	X	X	X	X		X	X	X	X		9
16-U	Plateros	SO		X	X							X		3
17-Y	Hangares	NE	X	X	X	X	X		X	X	X	X		9
18-P	UAM-Iztapalapa	SE		X	X					X				3
19-K	Aragón	NE	X		X									2
20-O	Netzahualcóyotl	NE	X		X						X			3
21-O	IMP	NO			X									1
22-W	Benito Juárez	SO		X	X	X	X							4
23-R	Taxqueña	SE		X	X					X				3
24-V	Insurgentes	C			X									1
25-A	Cuitláhuac	NO			X									1
26-TLI	Tultitlán	NO	X		X	X	X		X		X			6
27-AT	Atizapán	NO	X		X	X	X							4
28-VF	Villa de las Flores	NE	X		X	X	X		X		X			6
29-CJ	Cuejimalpa	NO		X										1
30-TL	Tlalpan	SE		X										1
31-CH	Chapingo	NE		X										1
32-TH	Tláhuac	SE	X	X							X			3
Número de estaciones			21	19	21	13	13	3	6	10	6	11		
Red Manual de Monitoreo Atmosférico														
PO	Porteles	SE								X				1
PD	Pedregal	SO								X	X		X	3
FA	Felipe Angeles	SO								X				1
TX	Taxqueña	SE								X				1
ES	Cerro de la Estrella	SE								X	X		X	3
VC	Vicentina	SE								X				1
NT	Netzahualcóyotl	SE								X				1
AP	Aeropuerto	NE								X				1
BER	Fray Bernardino	SE								X				1
MU	Museo CD. de México	CE								X				1
MC	Merced	SE								X	X		X	3
CFE	Museo Tecnológico	SO								X				1
LO	Lomas	SO								X				1
SH	Secretaría de Hacienda	NO								X				1
TL	Tlalnepantla	NO								X	X		X	3
VI	La Villa	NE								X				1
XA	Xalostoc	NE								X	X		X	3
LP	La Presa	NE								X				1
CHA	Chapingo	NE								X				1
Número de estaciones										19	5		5	

Modificado de: Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica en el Valle de México, 1993.

El comportamiento del bióxido de azufre - contaminante emitido principalmente por industrias y establecimientos de servicios - en tres de las zonas (noroeste, suroeste y sureste) no rebasa prácticamente en ninguno de los años el valor límite, en tanto que en el centro sólo lo rebasó 12 días al año en 1989, siete en 1991 y ha tendido a disminuir de manera importante ya que sólo superó el criterio tres días en 1992; por el contrario, en el noreste (zona altamente industrializada) aún a la fecha se rebasa dicho límite, más de seis días al año; en 1986 superó la norma seis días, en 1988 15 días, en 1989 seis días, en 1991 trece días, en 1992 diez días. y ninguna en 1993, ni tampoco en los meses transcurridos de 1994 (hasta junio). La concentración máxima registrada en 1993 fue 31% menor a la de 1992 y 39% inferior a la de 1991.

Como se sabe, entre las acciones más importantes de prevención y control de la contaminación se encuentra la producción de combustibles con bajo contenido de azufre y el cambio de uso de combustóleo a gas en las dos termoeléctricas situadas en la ZMCM, para contribuir a abatir las emisiones de bióxido de azufre.

El monóxido de carbono - emitido principalmente por vehículos automotores - es uno de los contaminantes más frecuentes en la ZMCM. Los últimos datos revelados nos muestra cómo se ha ido reduciendo en tres de las zonas (noroeste, centro y suroeste) hasta mantenerse por debajo del límite permisible en 1992 que solo se registraron 23 violaciones a la norma, mientras que en 1993 ya no se presentó ninguna.

Los niveles máximos de monóxido de carbono registrados en 1993 fueron 38% menores a los de 1992 y 55% inferiores a los de 1991. Durante los meses enero- junio de 1994, tampoco se excedieron la norma. La Merced fue la zona que presentó mayor número de días sobre el valor criterio, para el período 1987-1994; en el último año la rebasó durante 22 días. El uso de gasolinas oxigenadas, introducidas en 1989, permite reducir las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos, ya que ayudan a mejorar la combustión a la altura de ZMCM.

En lo que se refiere al **bióxido de nitrógeno** - emitido tanto por fuentes fijas como móviles - ha tendido a disminuir en las cuatro zonas en donde antes de 1992 se rebasaba el valor máximo permitido. El noroeste y el centro son las zonas en las que más frecuentemente se ha rebasado la norma. Este contaminante muestra un patrón de comportamiento estable a partir de 1991, si bien pueden apreciarse reducciones en 1993, durante la temporada de lluvias. Las concentraciones máximas rebasan ligeramente la norma de calidad únicamente durante los meses de período invernal.

Por ser este contaminante uno de los factores para la generación de ozono, los esfuerzos por abatir las emisiones de este contaminante deberán continuar como prioritarias.

El ozono constituye uno de los problemas más difíciles de resolver, no tan sólo en la ZMCM sino en gran parte de las ciudades del mundo en las cuales se presenta. Su tendencia va notoriamente en aumento superando los 300 IMECAS, como sucedió durante el invierno de 1990-1991 lo que obligó a operar el Plan de Contingencias Ambientales en su fase II durante 3 días consecutivos.

Entre abril de 1991 y marzo de 1992 se registraron 162 días con valores arriba de los 250 IMECAS, siendo necesario aplicar en 21 ocasiones la Fase II del Programa de Contingencias.

Entre abril de 1992 y marzo de 1993 se registraron 107 con valores arriba de los 250 IMECAS es decir 34% menos que en el período anterior.

Entre abril de 1991 y marzo de 1992 se registraron 162 días con niveles de ozono superiores a los 200 IMECA.

Los niveles de ozono máximos diarios registrados entre los meses de enero y junio del 94 han sido, en promedio, 2% menores que en 1993, 30% menores a los del 92 y 23% menores a los mediados en 1991. No obstante los altos niveles que aún persisten y el excesivo número de horas en que se viola la norma, nos indican que tenemos que ampliar significativamente el esfuerzo hasta ahora realizado.

Concentración de los principales contaminantes en diciembre de 1992.

Ozono (ppm)

Zona	No. de datos	Myno	Max	Prom
Noroeste	31	22	0.355	0.172
Noreste	31	26	0.263	0.165
Centro	31	26	0.393	0.209
Suroeste	31	27	0.402	0.198
Sureste	31	27	0.28	0.176

Bióxido de azufre (ppm)

Zona	No. de datos	Myno	Max	Prom
Noroeste	31	0	0.059	0.043
Noreste	31	0	0.12	0.068
Centro	31	0	0.068	0.046
Suroeste	31	0	0.043	0.028
Sureste	31	0	0.122	0.049

Bióxido de nitrógeno (ppm)

Zona	No. de datos	Myno	Max	Prom
Noroeste	31	0	0.191	0.109
Noreste	31	0	0.191	0.109
Centro	31	4	0.277	0.126
Suroeste	31	0	0.12	0.065
Sureste	31	1	0.241	0.087

Monóxido de carbono (ppm)

Zona	No. de datos	Myno	Max	Prom
Noroeste	31	0	10.4	6.6
Noreste	31	0	12.9	6.8
Centro	31	0	9.9	6.8
Suroeste	31	0	9.2	4.8
Sureste	31	0	10.9	5.6

Myno = días mayores al valor criterio

Máx = concentración máxima

Prom = concentración promedio

ppm = partes por millón

Fuente : Boletín Informativo de la Calidad del Aire No. 12 Instituto Nacional de Ecología, 1992.

4.- LEYES Y REGLAMENTOS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA

En México hemos tenido un desarrollo relativamente reciente en lo que respecta a leyes y reglamentos para el control de la contaminación atmosférica, el cuál ha ido evolucionando y de ser solo una materia incluida como un tema de salubridad y seguridad en el trabajo, pasó a ser una ley de control de la contaminación y actualmente se maneja el concepto de ley de control de la contaminación, que prevé el equilibrio ambiental, la planeación empresarial y el desarrollo sostenido.

La gestión de la calidad del ambiente está considerada como un ciclo en el que se identifican las siguientes etapas: percepción de problemas, planificación, elaboración de la legislación, establecimiento de normas, emisión de autorizaciones, elección de instrumentos para favorecer al ambiente y aplicación de los mismos.

Cabe señalar que en todo el mundo las políticas ambientales se encuentran en evolución. Está surgiendo lo que se identifica como una "segunda generación" de tales políticas, caracterizada, entre otras cosas, por enfocar la gestión ambiental a través de múltiples medios (aire, agua, suelo) y por articular las distintas políticas sectoriales. Así mismo, por incorporar, en grado cada vez mayor, el empleo de instrumentos económicos.

ANTECEDENTES HISTORICOS-LEGISLATIVOS EN MEXICO.

- Durante el período presidencial del General Cárdenas, se expide una ley para prevenir los malos olores provenientes de negociaciones mercantiles.
- 1971 Ley Federal para prevenir y controlar la contaminación ambiental.
- 1971 Reglamento para la prevención y control de la contaminación atmosférica originada por la emisión de humos y polvos.
- 1973 Reglamento para la prevención y control de la contaminación de las aguas.
- 1976 Reglamento para la prevención y control de la contaminación atmosférica originada por la emisión de ruido.
- 1982 Ley Federal de protección al ambiente.
- 1984 Reforma a la Ley Federal de protección al ambiente.
- 1987 Decretos a la importación o exportación de materiales o residuos peligrosos que por su naturaleza puedan causar daños al medio ambiente, propiedad o constituyen un riesgo a la salud o bienestar publico.
- 1988 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

PARTICIPACION EN LA GESTION AMBIENTAL

El Sistema Jurídico Mexicano, encuentra su fundamento y directriz en la Constitución Mexicana, en forma piramidal y descendente. Encontramos que con la Constitución, las leyes constitucionales, los tratados internacionales celebrados por el presidente de la República Mexicana y ratificados por el senado, son la suprema ley del país, hacia abajo jerárquicamente hablando encontramos las leyes generales, las leyes estatales, los reglamentos, bandos municipales y acuerdos de autoridades administrativas.

En materia ambiental, nuestro Sistema Jurídico ha definido a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, como su nombre lo dice; como una ley general, lo que significa que son competentes para conocer y aplicar la Ley, la Federación, los estados y los municipios.

PARTICIPACION DE LOS NIVELES DE GOBIERNO. (Competencia)

SEDESOL Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

SECRETARIAS
ESTATALES DE Leyes Estatales de Ecología.
ECOLOGIA

PRESIDENCIA Bandos Municipales.
MUNICIPAL

La Federación tendrá competencia en todo aquello que expresamente le reserve la ley, en tanto que lo que no quede reservado a la federación es competencia de los estados y municipios.

Al ser también una ley general, las Entidades Federativas pueden expedir sus propias leyes, así encontramos que prácticamente en todas las Entidades Federativas se cuenta con una ley estatal (a falta de disposición estatal, será la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente la que se aplique).

El problema ambiental permea horizontalmente a diversos sectores. Para afrontarlos, se requiere aumentar la capacidad para concertar e instrumentar acciones multisectoriales.

PARTICIPACION SECTORIAL EN LA GESTION AMBIENTAL.

Sector gubernamental:

El papel que juegan las autoridades públicas de los sectores que participan en la multiplicidad de aspectos que engloba la gestión ambiental se identifica a partir de las atribuciones y competencias que le confiere la *Ley Orgánica de la Administración Pública*, así como de los diversos reglamentos de cada dependencia del gobierno.

Otros Sectores:

Es de gran importancia identificar las modalidades de participación que pueden adoptar los actores sociales quiénes, dentro de un esquema de corresponsabilidad desempeñan una función decisiva en la instrumentación de las políticas ambientales del país. Algunas posibilidades de participación son:

- Actividades privadas.
- Grupos organizados.
- Instituciones académicas.
- Comunidad en general.

PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 1989 - 1994

El *Plan Nacional de Desarrollo 1989 -1994* (PND) se integró en cumplimiento con la Constitución y la Ley de Planeación y es resultado de una amplia consulta ciudadana y de un diagnóstico vivo de la realidad, de las aspiraciones y necesidades de la población.

La modernización de México es uno de los propósitos del Plan para hacer frente a las nuevas realidades económicas y sociales, razón por la cuál se destaca la obligación para el Estado de ser rector en el sentido moderno: conductor, promotor, articulador de las actividades dentro de las cuales cada quien persiga el interés nacional.

En materia económica, entre otros aspectos, se plantea que se ha llevado adelante una cuidadosa apertura de nuestra economía a la competencia internacional, a la eficiencia de nuestras industrias, a la lucha por los mercados exteriores; para lo cual se ha puesto en marcha un extenso programa de desregulación; se ha dado apertura a la inversión privada en obras de infraestructura; se ha hecho un esfuerzo interno y externo para promover las exportaciones y un nuevo reglamento para la inversión extranjera.

Destaca el establecimiento del *Programa Nacional de Solidaridad* (PRONASOL).

Entre las preocupaciones centrales del PND 1989 - 1994 se encuentra la modernización de la agricultura, la pesca, el turismo, la industria y el comercio exterior del país.

Entre sus más altas prioridades, el Plan asume el derecho a la protección y restauración del medio ambiente; y menciona que la calidad de vida, el desarrollo, el nivel de bienestar y el uso efectivo de las libertades adquieren su significado pleno en el respeto al equilibrio natural.

El objetivo fundamental en esta materia es armonizar el crecimiento económico con el restablecimiento de la calidad del ambiente, al tiempo que se promueve la conservación y el aprovechamiento racional de los recursos naturales.

4.1.- PROGRAMAS PARA LA PROTECCION DEL MEDIO AMBIENTE.

PROGRAMA NACIONAL PARA LA PROTECCION AL MEDIO AMBIENTE.

(PNPMA 1990 - 1994)

La anterior administración realizó grandes esfuerzos por desplegar una política ecológica orientada a alcanzar el objetivo general derivado del Acuerdo Nacional para el Mejoramiento Productivo del Nivel de Vida.

El objetivo general del PNPMA es armonizar el crecimiento económico con el restablecimiento de la calidad del ambiente, promoviendo la conservación y el aprovechamiento racional de los recursos naturales.

El PNPMA reconoce que, para lograr el objetivo establecido, requiere mejorar los sistemas productivos y transformar algunos hábitos y prácticas de la sociedad.

Además, el PNPMA indica que se mantendrá el establecimiento de las bases para lograr soluciones integrales que ataquen el origen de los problemas y no solamente sus consecuencias. Dicha concepción tiene su antecedente en las reformas a los artículos 27 y 73 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, las cuáles elevaron a rango constitucional la protección al ambiente y la preservación y restauración del equilibrio ecológico; así como en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), que recoge la decisión política de enfrentar los problemas ecológicos sumando los esfuerzos del Estado y la Sociedad.

PROGRAMA INTEGRAL CONTRA LA CONTAMINACION ATMOSFERICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO.

(PICCA)

El programa integral contra la contaminación atmosférica (PICCA) en la ZMCM, fue presentado en la ciudadanía el 15 de octubre de 1990.

Este programa se basa en cinco estrategias de acción prioritarias:

- 1.-El mejoramiento en la calidad de los combustibles, empleando criterios ambientales.
- 2.-La ampliación y mejoramiento del transporte colectivo y el control de emisiones de los vehículos en circulación.
- 3.-La modernización de la industria y establecimientos de servicio, incluyendo el mejoramiento de sus procesos y el control de sus emisiones.
- 4.-La protección de las áreas ambientalmente sensibles y la reforestación.
- 5.-La promoción de la investigación local, de la educación ambiental y de la participación ciudadana.

El PICCA, integró 41 medidas de control de la contaminación atmosférica, a partir de un diagnóstico detallado del problema en la ZMCM, de un análisis de las opciones técnicas para su control, del desarrollo de esquemas de financiamiento viables y de una amplia concertación social para asegurar el éxito de su instrumentación.

A continuación se presentan las 41 medidas del programa:

INDUSTRIA PETROLERA

1. Elaboración de gasolina de calidad ecológica internacional
2. Elaboración de diesel con bajo contenido de azufre.
3. Elaboración de combustóleo con bajo contenido de azufre.
4. Elaboración de compuestos oxigenados de TAME Y MTBE
5. Suministro de gasolina sin plomo para los vehículos 1991 y posteriores, equipados con convertidor catalítico.
6. Continuación del suministro de gasolina oxigenada con MTB.
7. Recuperación de azufre en la Refinería 18 de Marzo- CANCELADA POR CIERRE TOTAL DE LA REFINERIA
8. Recuperación de vapores de hidrocarburos y cambio de quemadores en la Refinería 18 de Marzo - CANCELADA POR CIERRE TOTAL DE LA REFINERIA
9. Instalación de medidores continuos de emisiones en chimeneas de la Refinería 18 de Marzo- CANCELADA POR CIERRE TOTAL DE LA REFINERIA

10. Instalación de membranas internas flotantes en los tanques de almacenamiento de combustibles en las terminales Azcapotzalco, Añil, Barranca del Muerto y San Juan Ixhuatepec.
11. Instalación de equipos para la recuperación de vapores en terminales de recibo y distribución de combustibles, así como en gasolineras.

TRANSPORTE

1. Instalación inmediata de convertidores catalíticos en vehículos a gasolina, modelo 1991.
2. Ampliación del Metro.
3. Renovación de R-100 con 4,071 unidades de baja emisión de contaminantes.
4. Reordenación y ampliación del sistema de transporte eléctrico.
5. Mejoramiento de vialidades, coordinación de modos de transporte, estacionamientos y semaforización.
6. Autorización de Rutas de Autobuses para reducir el uso de vehículos privados y estimular el transporte institucional, de escolares y empleados.
7. Continuación del programa "HOY NO CIRCULA".
8. Ampliación y Modernización del Programa de Verificación Obligatoria de Vehículos a gasolina, diesel y gas LP.
9. Conversión de flotillas de gasolina a gas LP y gas natural, incorporando convertidores catalíticos.
10. Introducción de convertidores catalíticos en Taxis, Combis y Microbuses.

INDUSTRIA Y ESTABLECIMIENTOS DE SERVICIO

1. Cambio de combustóleo por gas natural en industrias.
2. Convenios con la industria para el control de emisiones
3. Incentivos para una industria más limpia.
4. Racionalización del abasto de materiales y bienes en la Ciudad.
5. Control de emisiones y reubicación de fundidoras.
6. Realización de monitoreo continuo en las industrias más contaminantes.
7. Mejoramiento de procesos de combustión e instalación de equipo de control en establecimientos de servicio.
8. Utilización de gas natural en termoeléctricas.
9. Suspensión invernal en la operación de unidades de generación.
10. Instalación de monitores continuos de emisiones en las centrales termoeléctricas.

REFORESTACION Y RESTAURACION ECOLOGICA

1. Programa de reforestación urbana D.F.
2. Proyecto de reforestación del Valle de México y su área de influencia ecológica.

INVESTIGACION, SALUD AMBIENTAL, EDUCACION ECOLOGICA Y COMUNICACION SOCIAL

1. Programa de pruebas de dispositivos anticontaminantes y combustibles alternos en vehículos automotores.
2. Instalación de laboratorios de control de calidad de combustibles.
3. Ampliación y reforzamiento de la red automática de monitoreo Atmosférico (RAMA)
4. Estudio global de la calidad del aire (EGCA)
5. Instrumentación del sistema de vigilancia epidemiológica de la ZMCM.
6. Relación permanente con universidades y centros de investigación.
7. Capacitación de maestros y formación de los niños.
8. Programas de formación profesional y capacitación.

Con el fin de reforzar estas tareas el 8 de enero de 1992, se acordó la creación de la **Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación en el Valle de México**, como órgano de coordinación intergubernamental, que permite establecer objetivos, políticas y programas comunes, al rededor de los cuales cada una de las dependencias vinculadas con el ambiente concurren con sus facultades, responsabilidades y recursos.

La Comisión Metropolitana ha trabajado en la instrumentación y seguimiento del Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica en la ZMCM.

4.2.- LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE. (LGEEPA)

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) - publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 28 de enero de 1988 - abrogó la anterior Ley Federal para la Protección del Ambiente, expedida en 1982.

La LGEEPA, además de establecer un sistema integral de concurrencias entre la federación, los estados y los municipios, define la política ecológica general y regula los instrumentos para su aplicación, estableciendo disposiciones en materia de ordenamiento ecológico; evaluación de impacto y riesgo ambiental; protección de la flora y fauna silvestre y acuática, aprovechamiento sustentable de los recursos naturales; prevención y restauración ecológica en materia de aire, agua y suelo; participación social, educación ecológica; medidas de control y seguridad, así como sanciones.

Al definir los mecanismos de concurrencia entre los tres niveles de gobierno en materia de gestión ambiental, se determinan las bases para la descentralización, lo cual se ha traducido en una eficaz y expedita atención de los asuntos que más afectan a la población y a su entorno.

La actual Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente contiene un capitulado muy interesante que es el siguiente:

TITULO PRIMERO

DISPOSICIONES GENERALES.

- I.- Normas Preliminares.
- II.- Concurrencia entre la Federación, las Entidades Federativas y los Municipios.
- III.- Atribuciones de la Secretaría y coordinación entre las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal.
- IV.- Política Ecológica.
- V.- Instrumentos de la Política Ecológica.

TITULO SEGUNDO

AREAS NATURALES PROTEGIDAS.

- I.- Categoría, Declaratorias y Ordenamiento de Areas Naturales Protegidas.
- II.- Sistema Nacional de Areas Naturales Protegidas.
- III.- Flora y Fauna Silvestres y Acuáticas.

TITULO TERCERO

APROVECHAMIENTO RACIONAL DE LOS ELEMENTOS NATURALES.

- I.- Aprovechamiento Racional del Agua y los Ecosistemas Acuáticos.
- II.- Aprovechamiento Racional del Suelo y sus Recursos.
- III.- Efectos de la Explotación de los Recursos no Renovables en el Equilibrio Ecológico.

TITULO CUARTO

PROTECCION DEL AMBIENTE.

- I.- Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera
- II.- Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos
- III.- Prevención y Control de la Contaminación del Suelo.
- IV.- Actividades Consideradas como Riesgosas.
- V.- Materiales y Residuos Peligrosos.
- VI.- Energía Nuclear.
- VII.- Ruido, Vibraciones, Energía Térmica y Lumínica, Olores y Contaminación Visual.

TITULO QUINTO

PARTICIPACION SOCIAL (único).

TITULO SEXTO

MEDIDAS DE CONTROL Y DE SEGURIDAD.

- I.- Observancia de la Ley.
- II.- Inspección y Vigilancia.
- III.- Medidas de Seguridad.
- IV.- Sanciones Administrativas.
- V.- Recurso de Inconformidad.
- VI.- De los Delitos de Orden Federal.
- VII.- Denuncia Popular.

La Ley básica en materia ambiental es la Ley general del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, la cual contiene los siguientes reglamentos:

Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, en materia de impacto ambiental.

D.O.F 07-VI-1988.

Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, en materia de residuos peligrosos.

D.O.F 25-XI-1988.

Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas.

D.O.F 29-XI-1973.

Reglamento para la protección del ambiente contra la contaminación originada por la emisión de ruido.

D.O.F 06-XII-1982.

Reglamento para la prevención y control de la contaminación generada por los vehículos automotores que circulan en el D.F. y los municipios de su zona conurbada.

D.O.F 25-XI-1988.

Además de la ley y los reglamentos, se contemplan los criterios ecológicos y normas técnicas ecológicas.

Se cuenta en la actualidad con 83 normas técnicas y criterios ecológicos, de los cuales se publicaron 43 en la anterior administración, además de las tres primeras Normas Oficiales Mexicanas (NOM) - con carácter emergente - para la regulación de fuentes fijas. Dichas normas se basan en criterios de salud y tecnológicos, similares en gran medida a los que sustentan la normatividad de países altamente industrializados.

NORMA OFICIAL MEXICANA.

Con motivo de la expedición de la nueva *LEY FEDERAL SOBRE METROLOGIA Y NORMALIZACION D.O.F.01-VII-1992*. Tanto las Normas Técnicas Ecológicas (NTE), como las Normas Técnicas Sanitarias (NTS), expedidas por la Secretaría de Salud (SSA), dejaron de estar vigentes el 15 de octubre de 1993 y se transformaron en NOM de carácter obligatorio, siempre y cuando se hayan sustentado, entre otros criterios en el de costo-beneficio.

Es de gran importancia citar a la norma mexicana que fue expedida por primera vez con carácter emergente con la clave NOM - PA - CCAT - 019/93 (NE), el 30 de marzo de 1993 y publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 7 de abril del mismo año. Que atendiendo a las opiniones de los sectores involucrados, se determinó modificar los niveles máximos permisibles de emisiones a la atmósfera de contaminantes generados por los procesos de combustión que usan combustibles líquidos y gaseosos. Se considero que es necesario controlar durante todo el año la emisión a la atmósfera de este tipo de contaminantes, con la finalidad de asegurar la calidad del aire en beneficio de la salud de la población y el equilibrio ecológico.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-CCAT-019-ECOL/1993⁶ (NE), QUE REGULA LA CONTAMINACION ATMOSFERICA EN FUENTES FIJAS Y ESTABLECE LOS NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION A LA ATMOSFERA DE PARTICULAS (PST), MONOXIDO DE CARBONO (CO), OXIDOS DE NITROGENO (NO_x), OXIDOS DE AZUFRE (SO_x) Y HUMO, ASI COMO LOS REQUISITOS Y CONDICIONES PARA LA OPERACION DE LOS EQUIPOS DE COMBUSTION DE CALENTAMIENTO DIRECTO UTILIZADOS EN LAS FUENTES FIJAS, QUE USAN COMBUSTIBLES FOSILES LIQUIDOS Y GASEOSOS O CUALQUIERA DE SUS COMBINACIONES.⁷

En la modificación de esta norma oficial mexicana con carácter emergente participaron:

- SECRETARIA DE DESARROLLO SOCIAL.
- COMITE CONSULTIVO NACIONAL DE NORMALIZACION DE CALDERAS Y RECIPIENTES A PRESION.
- SECRETARIA DE SALUD.
- SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E INDUSTRIA PARAESTATAL.
- PETROLEOS MEXICANOS.
- INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO.
- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD.
- CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LA TRANSFORMACION.
- ASOCIACION NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA.

⁶ En 1994 se emitió una modificación a esta norma, sin embargo esta tiene muy pequeñas modificaciones.

⁷Se exceptúa los calentadores de agua domésticos, las estufas, los anafres y los asadores.

- CLAYTON DE MEXICO, S. A.
- CERREY, S. A. DE C. V.
- SELMEC, S. A. DE C. V.
- FABRICA DE JABON LA CORONA, S. A. DE C. V.

Esta norma dentro de sus especificaciones establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, y humo de los equipos de combustión de las fuentes fijas de esta norma oficial mexicana, son los establecidos en las tablas 4.1 y 4.2.

La medición y análisis de las emisiones deben realizarse con la frecuencia y métodos que se indican en la tabla 4.3.

Los métodos equivalentes a que se refiere la tabla 4.3 tendrán que ser los que se contemplan en la tabla 4.4.

Los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de neblina de ácido sulfúrico para equipos de combustión con capacidad térmica de 5,250 MJ/hr (150 cc) y mayores que utilizan combustibles fósiles líquidos, son los establecidos en la tabla 4.5.

TABLA 3.1. EQUIPO EXISTENTE

CAPACIDAD	TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO	DENSIDAD HUMO	PARTICULAS (PST) mg/m ³ (1)			OXIDOS DE NITROGENO (ppm v) (1)			BIOXIDO DE AZUFRE (ppm v) (1)			CO (ppm v) (1)
		NUMERO DE MANCHA U OPACIDAD	ZONAS CRITICAS		RP	ZONAS CRITICAS		RP	ZONAS CRITICAS		RP	
			ZM CM	OTR A		ZM CM	OTR A		ZM CM	OTR A		
HASTA 5250 MJ/HR (150cc)	COMBUSTOLEO GASOLEO	6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	250
	OTROS LIQUIDOS	5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	GASEOSOS	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
DE:5251 A 43000 MJ/hr 151 A 1200 cc	LIQUIDOS	NA	100	300	400	150	200	270	1100	1650	2600	400
	GASEOSOS	NA	NA	NA	NA	130	150	180	NA	NA	NA	
DE:43001 A 110000 MJ/hr 1201 A 3100 cc	LIQUIDOS	NA	70	250	350	140	180	250	1000	1500	NA	400
	GASEOSOS	NA	NA	NA	NA	120	140	160	NA	NA	2200	
MAYOR DE 110000 MJ/hr 3100 cc	LIQUIDOS	10% (3)	70	200	300	130	150	230	800	1200	NA	400
	GASEOSOS	NA	NA	NA	NA	100	130	150	NA	NA		

TABLA 4.2. EQUIPO DE NUEVA INSTALACION

.HAST A 43000 MJ/hr (1200cc)	CUALQUIER TIPO DE COMBUSTIBLE E EMPLEADO	DEBEN CUMPLIR CON LOS LIMITES INDICADOS EN LA TABLA 1 PARA LA ZMCM Y CONTAR CON TECNOLOGIA DE BAJA EMISION DE OXIDOS DE NITROGENO										350
MAYORES DE 43000 MJ/hr (1200cc)	COMBUSTIBLE O GASOLEO OTROS LIQUIDOS	10% (3)	50	150	250	400	400	150	100	140	200	350
	GASEOSOS	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
REPARACION MAYOR O RECONVERSION DE EQUIPOS EXISTENTES		DEBERAN CUMPLIR CON LOS LIMITES INDICADOS EN LA TABLA 1 PARA LA ZMCM E INTRODUCIR TECNOLOGIA DE BAJA EMISION DE OXIDOS DE NITROGENO										

NOTAS:(1) CONCENTRACIONES REFERIDAS A 25 C, 760 mm Hg, 5% DE OXIGENO EN VOLUMEN Y BASE SECA CON LA FORMULA SIGUIENTE $F = 16 / (21 - O_2 \text{ (medido)})$

(2) CONCENTRACIONES REFERIDAS A CONDICIONES DE OPERACION

(3) % DE OPACIDAD

RP: ZONAS DEL RESTO DEL PAIS

ZMCM: ZONA METROPOLITANA CIUDAD DE MEXICO

NA: NO APLICA

TABLA 4.3. MEDICION Y ANALISIS DE GASES DE COMBUSTION.

CAPACIDAD DEL EQUIPO COMBUSTION MJ/hr (CC)	PARAMETRO	FRECUENCIA MINIMA DE MEDICION	TIPO DE MEDICION	TIPO DE COMBUSTIBLE
HASTA: 5250 MJ/hr (150cc)	DENSIDAD DE HUMO	1 VEZ CADA 3 MESES	PUNTUAL (3 MUESTRAS) MANCHA DE HOLLIN	LIQUIDOS
	CO	1 VEZ CADA 3 MESES	CONTINUA (MINIMA POR 45 MIN) CELDA ELECTROQUIMICA O EQUIVALENTE	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂	1 VEZ CADA 3 MESES	PUNTUAL (3 MUESTRAS) ORSAT O EQUIVALENTE	LIQUIDOS Y GASEOSOS
DE: 5251 A 43000 MJ/hr (151 A 1200cc)	PARTICULAS TOTALES Y NEBLINAS DE ACIDO SULFURICO	UNA VEZ POR AÑO	ISOCINETICO (MINIMO POR 60 MIN) 2 MUESTRAS DEFINITIVAS	LIQUIDOS
	NO _x	UNA VEZ POR AÑO	CONTINUO (MINIM 45 MIN) QUIMILUMINISCENCIA O EQUIVALENTE	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	SO ₂	UNA VEZ POR AÑO	PUNTUAL POR TORINO INFRARROJO NO DISPERSIVO O EQUIVALENTE	LIQUIDOS
	CO	UNA VEZ POR AÑO	CONTINUO (MINIMO POR 45 MIN) INFRARROJO NO DISPERSIVO O ELECTROQUIMICO	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂	DIARIO	PUNTUAL (3 MUESTRAS) ORSAT O EQUIVALENTE	LIQUIDOS Y GASEOSOS

DE: 43001 A 110000 MJ/hr (1201 A 3100cc)	PARTICULAS TOTALES Y NEBLINAS DE ACIDO SULFURICO	UNA VEZ POR AÑO	ISOCINETICO (MINIMO POR 60 MIN) 2 MUESTRAS DEFINITIVAS	LIQUIDOS
	NO _x	1 VEZ CADA 6 MESES	CONTINUO (MINIM 45 MIN) QUIMILUMINISCENC IA O EQUIVALENTE	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	SO ₂	UNA VEZ POR AÑO	PUNTUAL POR TORINO INFRARROJO NO DISPERSIVO O EQUIVALENTE	LIQUIDOS
	CO	UNA VEZ POR MES	CONTINUO (MINIMO POR 45 MIN) INFRARROJO NO DISPERSIVO ELECTROQUIMICO O EQUIVALENTE	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂	UNA VEZ POR TURNO	PUNTUAL (3 MUESTRAS) ORSAT O EQUIVALENTE	LIQUIDOS Y GASEOSOS
MAYOR DE: 110000 MJ/hr (3100cc)	PARTICULAS TOTALES Y NEBLINAS DE ACIDO SULFURICO	1 VEZ CADA 6 MESES	ISOCINETICO (MINIMO POR 60 MIN) 2 MUESTRAS DEFINITIVAS	LIQUIDOS
	OPACIDAD	PERMANENTE	CONTINUA OPACIMETRO CON REGISTRO COMO MINIMO	LIQUIDOS
	NO _x	PERMANENTE	CONTINUA QUIMILUMINISCENC IA CON REGISTRO COMO MINIMO	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	SO ₂	PERMANENTE	CONTINUA INFRARROJO NO DISPERSIVO ULTRAVIOLETA O EQUIVALENTE CON REGISTRO COMO MINIMO	LIQUIDOS
	CO	PERMANENTE	CONTINUA INFRARROJO NO DISPERSIVO O EQUIVALENTE CON REGISTRO COMO MINIMO	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	O ₂	PERMANENTE	CONTINUA CAMPO MAGNETICO O EQUIVALENTE CON REGISTRO COMO MINIMO	LIQUIDOS Y GASEOSOS

**TABLA 4.4. (METODOS EQUIVALENTES)
CONTAMINANTES Y SUS METODOS DE MEDICION PARA FUENTES FIJAS**

CONTAMINANTE	METODO DE MEDICION	METODO EQUIVALENTE
PARTICULAS SUSPENDIDAS TOTALES	* ISOCINETICO * HUELLA O MANCHA DE HOLLIN * OPACIDAD	
OXIDOS DE NITROGENO	* QUIMILUMINICENCIA	* INFRARROJO NO DISPERSIVO
OXIDOS DE AZUFRE	* VIA HUMEDA (TORIN) * INFRARROJO NO DISPERSIVO	* FLUORECENCIA PULSANTE * ULTRAVIOLETA
MONOXIDO DE CARBONO	* INFRARROJO NO DISPERSIVO * CELDAS ELECTROQUIMICAS	
BIOXIDO DE CARBONO	* INFRARROJO NO DISPERSIVO * CELDAS ELECTROQUIMICAS	* ORSAT (O ₂ , CO ₂ Y CO)
OXIGENO	* CELDAS ELECTROQUIMICAS * PARAMAGNETICOS	* ORSAT (O ₂ , CO ₂ Y CO) * OXIDOS DE ZIRCONIO (CELDAS ELECTROQUIMICAS)

TABLA 4.5. NIVEL MAXIMO PERMISIBLE DE ACIDO SULFURICO

ZONAS CRITICAS		mg/m ³ (a)
ZONAS CRITICAS	ZMCM	40
	OTRAS	60
RESTO DEL PAIS		90

(a) Concentración referida a condiciones de 298°K (25 °C), 101,325 pascales (760 mmHg) base seca y 5% en volumen de O₂.

PARTE III

TECNOLOGIAS PARA EL CONTROL DE EMISIONES CONTAMINANTES EN FUENTES FIJAS

Como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, los principales contaminantes de la atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México son:

- Oxidos de Nitrógeno
- Oxidos de Azufre
- Partículas Suspendidas Totales
- Monóxido de Carbono
- Plomo
- Hidrocarburos y
- Ozono.

Las tecnologías que se tratan en los siguientes capítulos, se enfocan al control de los primeros tres contaminantes, ya que para el control de los restantes tenemos que:

- 1.- Los HC no han demostrado efectos adversos directos sobre la salud humana⁸ y su control corresponde a la óptima operación de los sistemas y procesos de combustión.
- 2.- Más del 90 % de las emisiones de CO se llevan a cabo por las fuentes móviles⁹ y además el control del CO es resultado de la aplicación del uso eficiente de la energía en los diferentes niveles de sistemas y equipos de combustión tanto de fuentes móviles como estacionarias.
- 3.- Una de las principales fuentes de plomo en la actualidad, son las gasolinas, las cuales en su mayoría son consumidas por vehículos automotores (fuentes móviles), además de que a partir de septiembre de 1990 comenzó a distribuirse en todo el país la magna sin (gasolina sin plomo).

Y debido a las siguientes consideraciones, se desarrollarán solo las tecnologías de-NO_x de-SO_x y Partículas:

- 1.- El control de los NO_x reduce también la formación de O₃.
- 2.- La disminución de NO_x y SO_x contribuyen a reducir las lluvias ácidas.
- 3.- Las emisiones de partículas constituyen un gran potencial adverso a la salud humana, por su capacidad de combinación con otros compuestos (SO_x).

⁸ Referencia, Contaminación del aire (Origen y control) K. Wark., pag. 53

⁹ Referencia, La ciudad de México (Contaminación atmosférica) Quadri pag. 117

68

5.- TECNOLOGIAS PARA LA REDUCCION DE OXIDOS DE NITROGENO

5.1.- MECANISMO DE FORMACION DE NO_x.

Las medidas para el control de NO_x aplicadas a los equipos de combustión estacionarios se pueden dividir grosamente en dos ramas, una debida a las tecnologías de combustión las cuales se enfocan al control de la reacción que produce el contaminante y otra derivada de las tecnologías usadas en la postcombustión para la remoción del contaminante, como lo representan los reductores catalíticos selectivos (SCR).

Del conocimiento que se tenga sobre el mecanismo de formación de los NO_x tanto térmico como del combustible, se avanzara en la eficiencia de reducción que presentan las tecnologías para el control de NO_x.

En lo que respecta a los NO_x del combustible, no todo el contenido de nitrógeno es convertido a NO. A la razón de los contenidos de nitrógeno que realmente se convierten en NO, entre el total de contenidos de nitrógeno en el combustible, suponiendo que este último es totalmente convertido en NO, se le llama razón de conversión de NO de combustible.

Los compuestos de nitrógeno contenidos en el combustible tienen una configuración muy complicada, y no se ha detallado aún a través de que proceso y en que forma de productos intermedios serán disueltos. De acuerdo a los cálculos de velocidad-teórica estos asumen simplemente que todos los contenidos de nitrógeno en el combustible se liberan en forma de átomos de nitrógeno y los resultados indican que la razón de conversión de los NO_x de combustible se elevan en proporción al incremento de la cantidad de aire y temperatura.

Dentro de los combustibles más usados y listados en el orden en el cual presentan su contenido de nitrógeno están: el combustóleo, el carbón y el gas natural. Actualmente datos de investigaciones en motores Diesel indican que del total de emisiones de NO_x, el porcentaje correspondiente a la formación de estos por el combustible es del 20 % y el 80 % restante es debido al nitrógeno del aire que se oxida en la combustión (NO_x térmico).

Inicialmente se consideraba que la formación de los NO_x se debía principalmente a los NO_x térmicos, sin embargo, poco a poco se ha demostrado la influencia del nitrógeno contenido en el combustible, o sea los NO_x del combustible.

En la actualidad existen muchos cuestionamientos sobre los mecanismos de formación del NO_x térmico, así como de las medidas de su control total.

En los equipos de combustión típicos tales como calderas, recuperadores de calor, turbinas de gas y hornos los tipos de NO_x emitidos son: NO , NO_2 , N_2O , N_2O_3 , N_2O_4 , y N_2O_5 . Los primeros dos tipos de óxidos de nitrógeno son los que prevalecen sobre los demás y más aun, dentro del propio equipo los NO prevalecen sobre la cantidad de NO_2 debido a que la temperatura es un factor importante en su formación, por ejemplo en la cámara de combustión y en los gases de escape se tiene que del total de NO_x , del 90 al 95 % son NO y el resto NO_2 , aunque después al salir a la atmósfera todos los NO se oxidan a NO_2 debido a que decae la temperatura.

La formación del NO y el NO_2 es debida a las siguientes reacciones de equilibrio, las cuales ocurren simultáneamente en los procesos de combustión reales.

$\text{N}_2 + \text{O}_2 = 2\text{NO}$ Reacción de equilibrio del NO .

$\text{NO} + 1/2 \text{O}_2 = \text{NO}_2$ Reacción de equilibrio del NO_2 .

Y se tiene que las ecuaciones respectivas para las constantes de equilibrio (K_p) son:

$K_p = (\text{P}_{\text{NO}})^2 / (\text{P}_{\text{N}_2})(\text{P}_{\text{O}_2})$ constante para el NO (a partir de O_2).

$K_p = (\text{P}_{\text{NO}_2}) / (\text{P}_{\text{NO}})(\text{P}_{\text{O}_2})^{1/2}$ constante para el NO_2 (a partir de NO).

Donde se representan las presiones parciales del NO , del NO_2 , N_2 y del oxígeno.

Cabe mencionar que tanto la formación del NO como del NO_2 , dependen de la temperatura al igual que los valores de las constantes de equilibrio respectivas, pero con la diferencia de que la generación de NO aumenta con la temperatura y el NO_2 disminuye, es por esto que la generación principal es NO y posteriormente a la temperatura ambiente se transforma a NO_2 , que es como se encuentra comúnmente en el ambiente.

El mecanismo cinético de las reacciones de formación del NO y del NO_2 no son tan simples y todavía se encuentran a discusión algunos aspectos, existe la evidencia que desde la zona de precalentamiento de los equipos se inicia la formación de importantes cantidades de NO_2 , mientras que en la zona de flama parte de estos se descomponen en NO , y dentro de la misma zona de flama y por encima de ella, se generan las principales fuentes de NO .

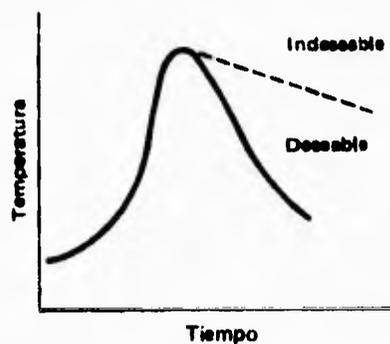
La generación de NO_x depende de tres factores en general los cuales son:

- Temperatura .
- Tiempo.
- Cantidad de aire en la mezcla (cantidad de oxígeno).

A partir del control de estos tres parámetros en los equipos de combustión se tendrán emisiones bajas en NO_x , y en consecuencia se debe tener especial interés en los siguientes puntos que son derivados de los factores anteriores:

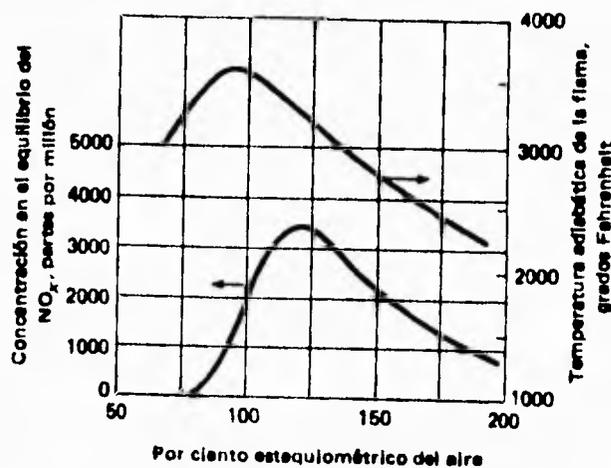
- 1.- Evitar altas temperaturas ó altas tasas de liberación de calor.
- 2.- Tratar de tener en la combustión altas tasas de remoción de calor o limitar a un tiempo mínimo la residencia de temperaturas pico. (Es importante conocer las gráficas de T-t de las zonas de combustión de los equipos ya que nos arrojan información sobre composición de los gases de salida).

Gráfica 5.1 Perfil de temperatura Vs. tiempo



- 3.- Conocer u obtener para un cierto equipo dado y combustible utilizado, las curvas correspondientes de emisiones de NO_x Vs. el porcentaje de aire estequiométrico para elegir el punto óptimo de operación con la relación A/C y la emisión mínima, con excepción de las turbinas de gas que trabajan con relaciones A/C muy altas.

Gráfica 5.2 Valores calculados de equilibrio del NO_x



SELECCION DE COMBUSTIBLE Y EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE PRECALENTADO A COMBUSTION.

Dado que la mayoría de combustibles utilizados en la combustión contienen cantidades significativas de nitrógeno químicamente enlazado en los hidrocarburos y es una fuente importante en la formación del NO_x de combustible, se recomienda seleccionar si es posible combustibles que contengan bajo contenido de nitrógeno.

Compuestos de anillo heterocíclico, como la piridina, piperidina y quinolina característicos del petróleo, contienen cantidades importantes de nitrógeno enlazado a los hidrocarburos. El carbón contiene compuestos productores tanto de anillo como de cadena y el gas natural está esencialmente libre de dichos compuestos. La siguiente tabla muestra el contenido de nitrógeno de algunos combustibles.

Tabla 5.1 Contenido de Nitrógeno en Combustibles.

TIPO COMBUSTIBLE	CONTENIDO NITROGENO
Kerosinas	0.005-0.01%
Aceite pesado A	0.02 -0.08%
Aceite pesado B	0.2 -0.3%
Gas Natural Licuado	indetectable

El contenido de nitrógeno en combustibles líquidos varía según su base, por lo tanto, los usuarios deben pedir combustible especialmente preparado, o sino analizar la formula.

El nitrógeno esta presente en el combustible en forma de compuestos-N orgánicos. El porcentaje del contenido de nitrógeno en el combustible que se oxida en NO_x - la razón de formación del NO_x - normalmente fluctúa entre el 30 y 50 %.

El precalentar el aire que entra en un proceso de combustión a pesar de que es una buena medida para el ahorro de combustible, tiende a incrementar la temperatura de flama y por lo tanto la generación de NO_x . Se han tenido resultados que indican un aumento triple en las emisiones de NO_x cuando el aire destinado a la combustión se precalienta de 27 a 316 °C en pruebas de gran escala.

5.2 TECNOLOGIAS PARA LA REDUCCION DE NO_x EN CALDERAS CONVENCIONALES.

Modificación de las Condiciones de Operación.

Combustión con una relación baja aire/combustible (operación bajo oxígeno).

Generalmente se suministra más aire a las flamas que el requerido teóricamente. Al eliminar tal exceso de aire, la formación del NO_x-térmico puede ser abatida. Sin embargo, relaciones bajas aire/combustible, pueden inducir que una combustión imperfecta incremente los contaminantes tales como el hollín, monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos inquemados.

La combustión puede ser controlada por medio de un medidor de CO en la mayoría de los casos.

Tabla 5.2 Efectos de la combustión con una relación aire combustible baja y desulfurización de tubos de humo sobre la concentración de contaminantes en los gases de combustión del combustóleo.

CONTAMINANTES	EXCESO DE AIRE (%)	
	8	2
NO ₂ (ppm)	500	350
SO ₂ (ppm)	1000 (90)*	1000 (90)
SO ₃ (ppm)	50 (25)	20 (90)
POLVO (MG/Nm ³)	150 (200)	200 (25)

* Valor después de la desulfurización.

En caso de tener un control sobre la cantidad del exceso de aire se tendría la seguridad de estar operando un equipo con baja generación de NO_x, o por lo menos en un punto óptimo alejado del 15% de exceso de aire, que es el punto de generación máxima promedio en las calderas convencionales.

Modificación de la combustión.

A).- Combustión en dos etapas.

Como ya se indicó, el efecto de un bajo exceso de aire en la formación del NO_x es importante, a partir de esto se puede aprovechar este efecto para aplicarse en la combustión en dos etapas.

El proceso de dos etapas consiste en llevar a cabo una combustión primaria con aire insuficiente (relación de aire: 0.8-0.9). En la etapa siguiente se añade el aire necesario para completar la relación de aire requerida hasta que se consiga una combustión perfecta.

La combustión en dos etapas disminuye los NO_x -termicos y los NO_x -combustibles por los siguientes factores:

- 1).- Concentración baja de oxígeno en la combustión primaria.
- 2).- La combustión secundaria minimiza ligeramente el tiempo de residencia del gas de combustión.

Las figuras 5.1 y 5.2 muestran diferentes generadores de vapor equipados con un sistema de combustión de dos etapas. En la fig. 5.1 se puede ver que los difusores de aire secundarios se colocan en la parte superior de la pared del horno, en la cual se instalan los quemadores. Para generadores de vapor pequeños o medianos con un solo quemador, como se muestra en la figura 5.2 los difusores se colocan de manera que formen un círculo alrededor del quemador.

Figura 5.1- Combustión en dos etapas en generador de vapor.

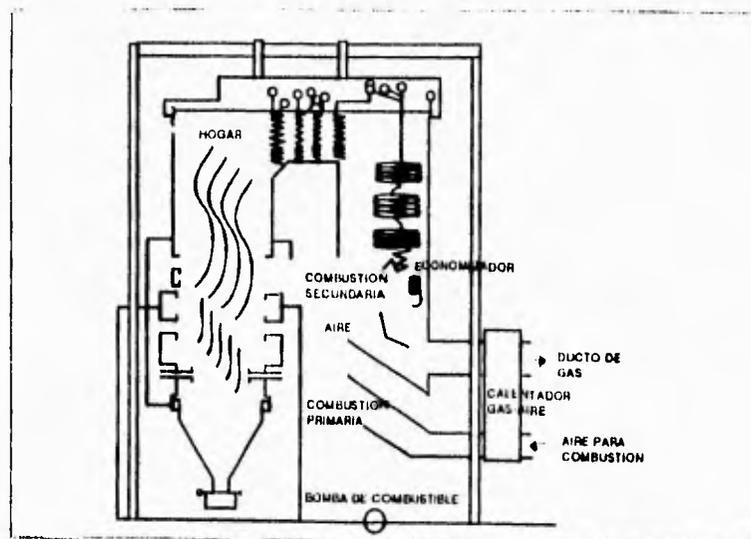
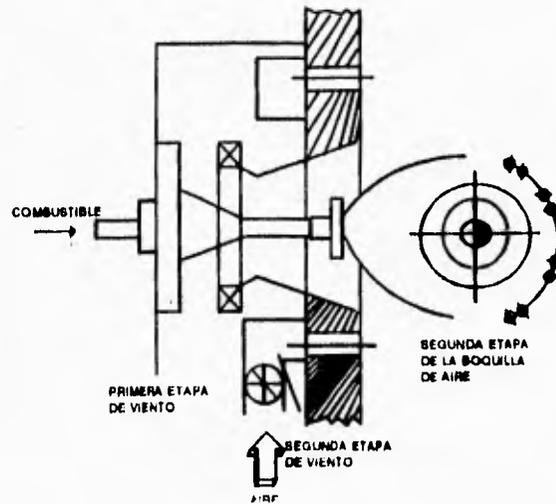
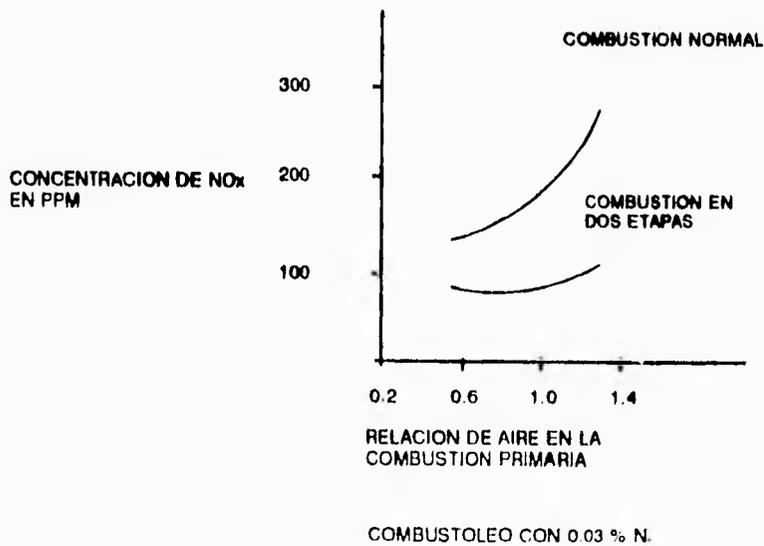


Figura 5.2 Quemador en dos etapas para generador de vapor.

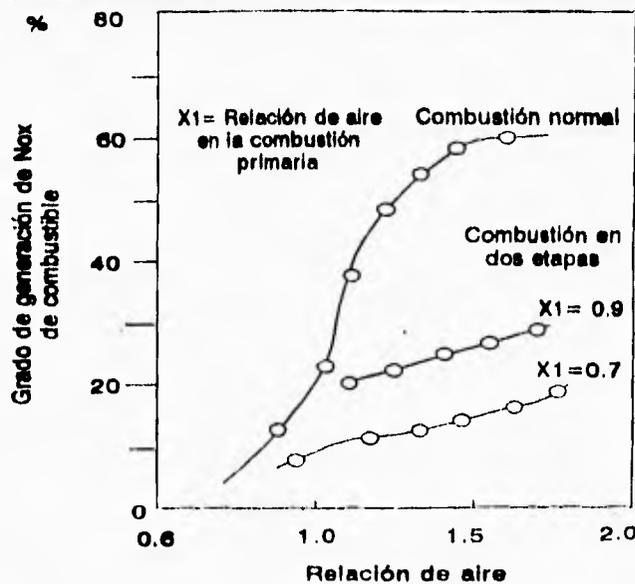


Como se indica en las gráficas 5.3 y 5.4, los NO_x -térmicos y los NO_x -combustible, se pueden reducir más eficientemente con relaciones de aire menores en la combustión primaria sin embargo, si esta relación es muy baja se incrementarán las emisiones de hollín.

Gráfica-5.3 Eficiencia de reducción del NO_x -térmico.

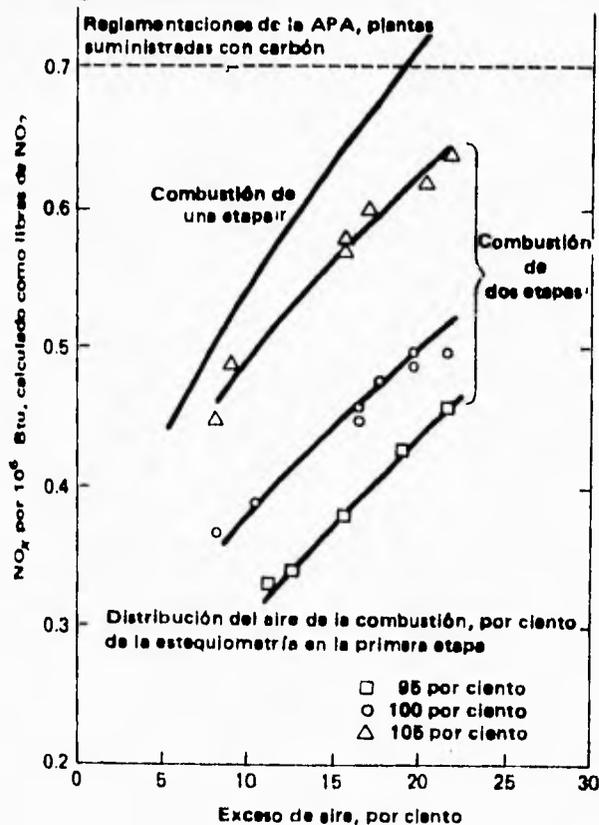


Gráfica 5.4 Eficiencia de reducción de NO_x de combustible.



La combustión en dos etapas es más difícil de adaptar en las calderas de carbón, ya que por la falta de exceso de aire, podrían ocurrir distribuciones peligrosas del combustible y del aire, lo que provocaría altas generaciones de CO. Finalmente podemos observar la comparación entre la combustión de una etapa y la combustión en dos etapas en la siguiente gráfica.

Gráfica 5.5 Comparación en la generación de NO_x en la combustión del carbón en una y dos etapas.



B).- La recirculación en los tubos de humo o recirculación de gases.

El método de la recirculación de gases de la combustión es empleado en el control de NO_x tanto para fuentes fijas como en móviles por lo que puede ser usado en motores de combustión de gasolina y diesel.

La recirculación de gases consiste en reinyectar una cierta cantidad de gas de combustión por medio de un ventilador, a la mezcla con aire de combustión a través de un ducto. Este gas adicional actúa como un sumidero térmico y reduce la temperatura de combustión global, además que se reduce la concentración de oxígeno, beneficiando ambos efectos a la reducción de NO_x (principalmente térmico).

Las desventajas que presenta el método de recirculación de gases pueden ser:

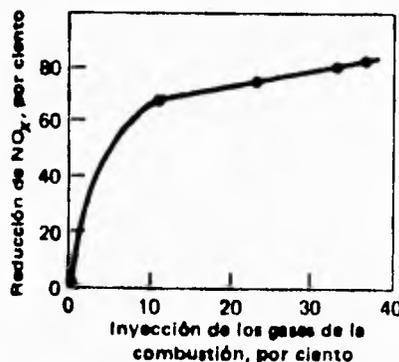
- 1.- Los altos costos de los ductos si se emplean grandes flujos de gases.
- 2.- El método es poco efectivo cuando se busca reducir los NO_x del combustible.

La cantidad de gas recirculado que se mezcla con el aire nuevo a combustión normalmente fluctúa entre 15 y 20 %. La eficiencia de la reducción del NO_x se incrementa linealmente con esta cantidad, sin embargo, una cantidad por encima del 30% provocara una combustión inestable.

Resultados obtenidos en hornos domésticos alimentados con petróleo muestran que con un 50 % de recirculación de gases a 15 % de exceso de aire, conduce a una reducción de NO_x hasta un 60 %.

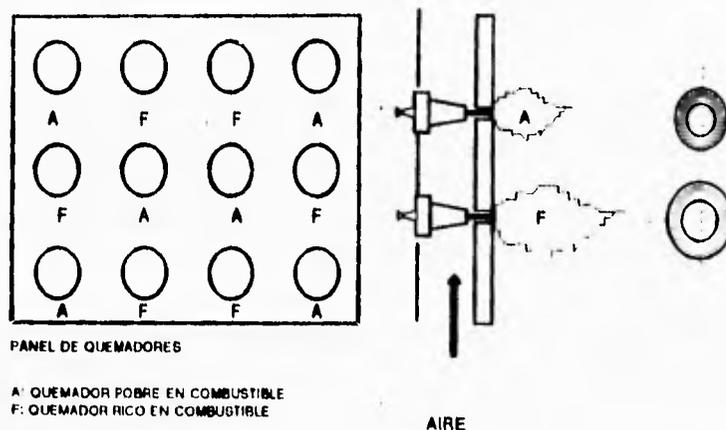
Este método es altamente efectivo para el gas natural y otros combustibles libres de nitrógeno como lo podemos constatar en la siguiente gráfica.

Gráfica 5.6 Efecto de la recirculación de gases en la emisión de NO_x para el gas natural con 7.5 % de exceso de aire sin precalentamiento.



C).- Método de combustión de combustibles pesados y ligeros.

Figura 5.3 Quemador de combustibles pesados y ligeros.



Como se muestra en la figura anterior, el panel cuenta con quemadores ricos y pobres en combustible alternados, además de contar con el suministro de aire para cada uno de los quemadores

Debido a que las flamas de los quemadores ricos en combustibles se queman a una proporción limitada, la temperatura permanece baja y estable. Después parcialmente se forma una atmósfera reductora y por lo tanto, se reducen los NO_x -térmicos y los NO_x -combustible (Teóricamente de la misma forma como en la combustión de dos etapas).

La razón del suministro de combustible para quemadores ricos en combustible y el suministro para quemadores pobres se debe de mantener entre 1.5 y 1.8, si se tiene una relación mayor se pueden incrementar la cantidad de hollín y otros combustibles no quemados.

D).- Combustión en tres etapas.

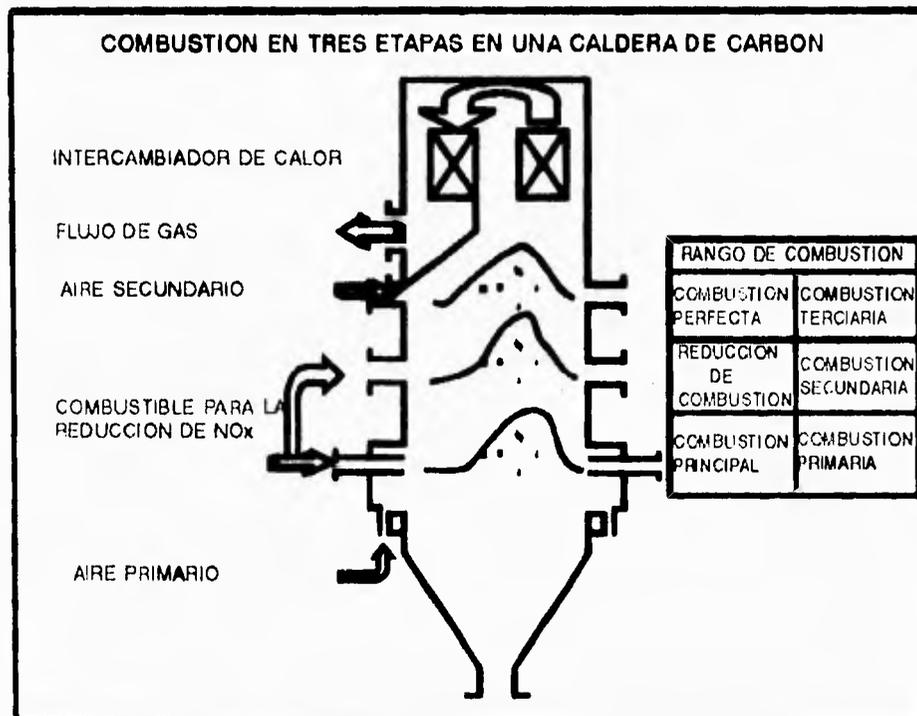
El proceso de la combustión en tres etapas es de los métodos en los que se necesita de mayor control en cada una de las etapas, pero a su vez brinda como resultado bajas emisiones de NO_x .

La combustión en tres etapas se lleva a cabo de la siguiente manera:

- 1.- Combustión primaria o principal.
- 2.- Combustión secundaria o de reducción.
- 3.- Combustión terciaria o perfecta.

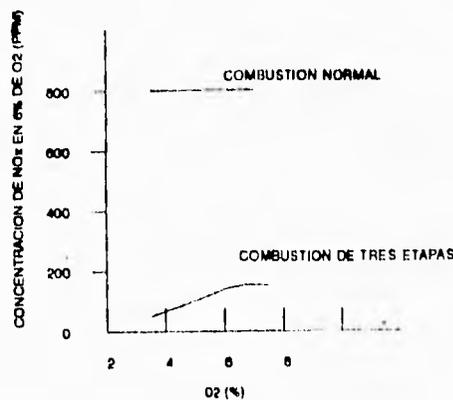
En la primera etapa se lleva a cabo la combustión con un ligero exceso de aire, en la cual se generan las principales cantidades de NO_x térmicos y de combustible. En la segunda etapa sin embargo, los gases llegan con suficiente oxígeno para llevar a cabo la reducción de NO_x térmicos (al formarse una atmósfera reductora) por la inyección de combustible (como se muestra en la fig. 5.4) la cual alimenta exclusivamente a las flamas en la combustión secundaria.

Figura 5.4 Combustión en tres etapas en una caldera de carbón.



Finalmente en la tercera etapa, se inyecta el aire secundario a las flamas hasta que se obtiene una combustión perfecta, abatiendo la formación de NO_x . La gráfica 5.7 muestra la eficiencia de reducción de NO_x en dispositivos quemadores de carbón. En éste proceso, se debe tener cuidado de no suministrar aire innecesario en la tercera etapa; si se suministra más aire que el necesario, la temperatura de la flama se elevará e incrementará la formación de NO_x .

Gráfica 5.7 Eficiencia de reducción de NO_x en la combustión en tres etapas.



E) Atomizado de agua/vapor y combustión con combustible en emulsión.

En algunos equipos se puede llevar a cabo una atomización con agua o vapor en las flamas de la combustión, consecuentemente la temperatura de las flamas decrece debido al calor latente del agua y por lo tanto se evita la formación de un porcentaje de NO_x -térmicos. El atomizado se realiza mediante una mezcla aire/vapor o agua en la combustión o desde la salida del quemador junto con el combustible.

Este método es apropiado para reducir los óxidos de nitrógeno (NO_x) del 10 al 15% cuando usamos combustible pesado. Sin embargo, al rociar con exceso, se obtendrán flamas inestables, eficiencias térmicas bajas y una acelerada corrosión en los equipos.

El Método de combustión con combustible en emulsión consiste en una mezcla de combustible, agua y restos de surfactante emulsificados por agitación. El agua en el combustible se evapora con el calor de la combustión reduciendo la temperatura de la flama con su calor latente. El combustible se atomiza y se dispersa para ser más accesible al aire, facilitando así la combustión con bajas concentraciones de oxígeno. Este método es utilizado para reducir la generación de NO_x un 5%, utilizando combustible con 10% de agua. Un combustible con alto contenido de agua, causará diferentes problemas, tales como una combustión inestable, una deterioración en la eficiencia térmica y corrosión en los alrededores de la flama.

F) Quemadores de bajo NO_x.

Los quemador de bajo NO_x, son especialmente diseñados para reducir óxidos de nitrógeno, están equipados con las tecnologías antes discutidas como son la recirculación de gases de combustión y la combustión en etapas etc. Algunos de los quemadores de bajo NO_x más utilizados se listan en seguida.

Tabla 5.3 Quemadores de bajo NO_x.

QUEMADOR	COMBUSTIBLE	EFICIENCIA
a-Combustión mezclada	Aceite pesado	30-40%
b-De flama dividida	Aceite pesado	50-70%
c-De recirculación interna	Aceite pesado	30-40%
d-De combustión en dos etapas	Gas	30-40%
e-De combs. pesados y ligeros	Aceite pesado	10-20%

Figura 5.5 Quemador con combustión mezclada.

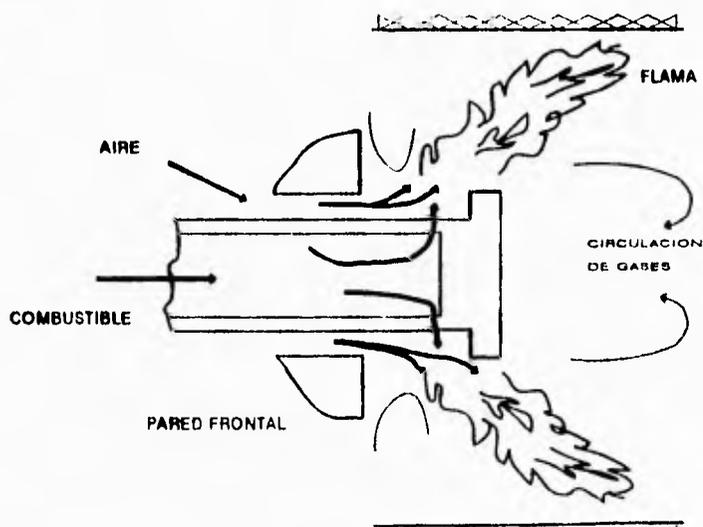


Figura 5.6 Quemador de flama dividida.

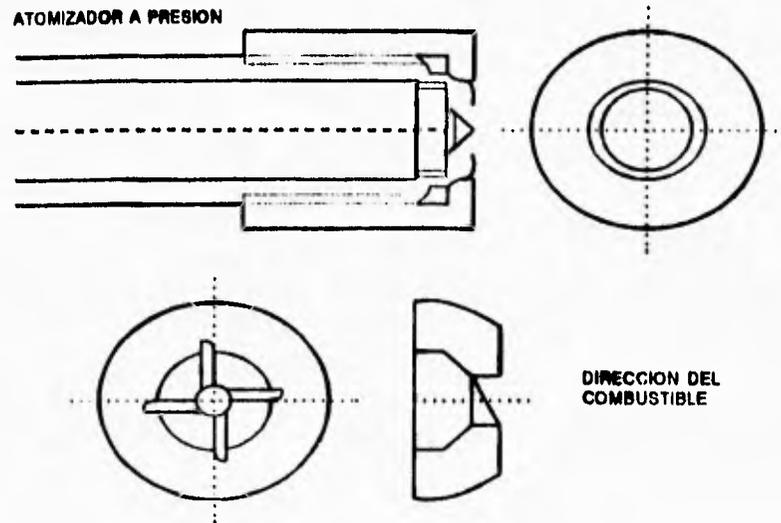


Figura 5.7 Quemador de recirculación interna.

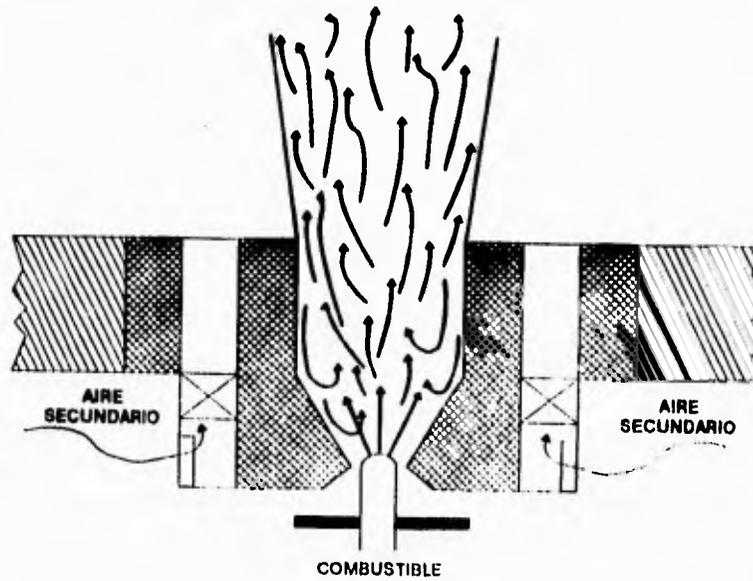


Figura 5.8 Quemador de combustión en dos etapas.

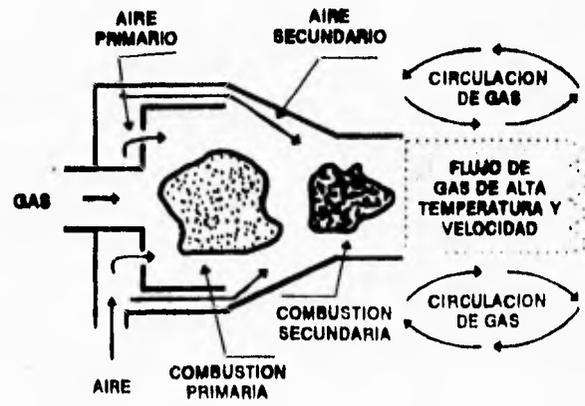
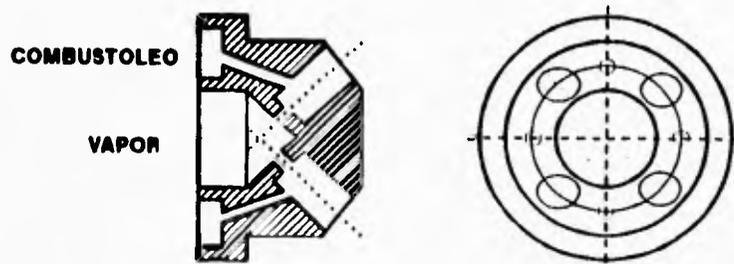


Figura 5.9 Quemador de combustóleo con inyección de vapor.



Métodos de postcombustión para el control de NO_x

A).- Tecnología SCR o Reducción Catalítica Selectiva.

La tecnología de la reducción catalítica selectiva es el método de postcombustión para el control de NO_x más efectivo cuando se requieren altas eficiencias de remoción (de 120 ppm ha 10 ppm) y su característica principal es utilizar amoníaco como agente reductor.

Cabe mencionar que esta tecnología se puede aplicar tanto en calderas convencionales como en recuperadores de calor (HRSG).

El sistema SCR (Selective Catalytic Reduction) para una caldera convencional consiste en los siguientes subsistemas:

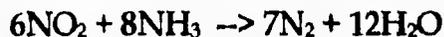
1. Equipo de inyección de amoníaco el cual cuenta con un tanque de amoníaco licuado, carburador y acumulador.

Esta parte del equipo recibe al flujo de gases que proviene del economizador del generador de vapor o caldera, para atomizar por medio de un inyector la mezcla óptima de amoníaco/aire a baja presión sobre el flujo de gases. En este momento ya se encuentra en el ducto del equipo una mezcla del flujo de gases con amoníaco diluido listo para reaccionar en el catalizador debido a la reacción que provocaran los compuestos reductores presentes en cada elemento del reactor-catalizador.

2. Reactor-catalizador.

En el reactor-catalizador se lleva a cabo la reducción de los NO_x y este consta de una estructura cuadrada de acero al carbón con espesores de 0.25 in. y dimensiones que pueden llegar a ocupar volúmenes hasta de 100 m³. La estructura interior esta conformada por varias capas de paneles catalizadores, por lo regular cada reactor cuenta con tres capas y con 24 bloks o elementos catalizadores por capa y un sistema de monorrieles para llenar los catalizadores y poder dar mantenimiento conjunto a un equipo soplador de hollín, los elementos catalizadores por lo general son de acero inoxidable y contienen compuestos catalíticos activados en base a óxido de titanio (TiO₂) o bien óxido de tungsteno (WO₃), óxido de vanadio (V₂O₅) y monóxido de molibdeno (MoO), al salir del reactor-catalizador los NO_x se han convertido en nitrógeno inofensivo (N₂) y vapor (H₂O).

Las principales reacciones de reducción tanto para el NO como para el NO₂ son las siguientes:



Un mol de amoníaco (NH_3) reacciona teóricamente con un mol de monóxido nítrico (NO), mientras que en la práctica la relación NH_3/NO fluctúa entre 1.1 y 1.2.

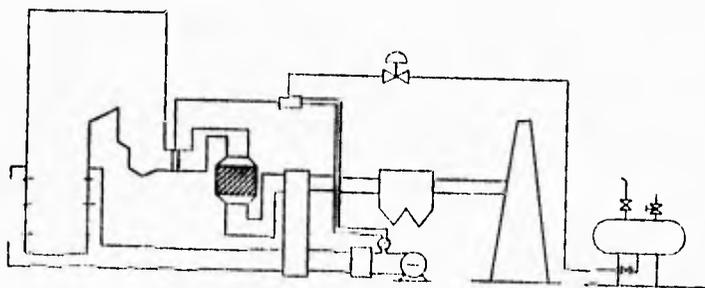
El rango de temperatura más adecuada para esta reacción de denitrificación se encuentra entre 300 y 400 °C y nos permite obtener una denitrificación de más de 65%.

Los catalizadores que contienen mas óxido de vanadio son altamente efectivos para reducir los NO_x . Sin embargo, por otro lado, el óxido de vanadio oxida al bióxido de azufre (SO_2) en trióxido de azufre (SO_3), el cual reacciona con el amoníaco y forma sulfato de amonio hidrogenado (NH_4HSO_4) se deposita en la superficie de la capa del catalizador y disminuye su capacidad catalítica, provocando obstrucción en los calentadores aire-gas. Por tales razones, la cantidad de óxido de vanadio se debe reducir tanto como sea posible.

Los reactores presentan una flexibilidad para adecuarse a una posible incremento en el volumen de gases a tratar y pueden hacerse adiciones posteriores de paneles catalizadores.

La aplicación de la tecnología SCR no solo queda limitada a las calderas convencionales, sino que se puede aplicar a los motores diesel y a las calderas de recuperación lo que la hace uno de los métodos de postcombustión más aplicados en la actualidad, la figura 5.10 muestra el SCR en una caldera convencional.

Figura 5.10 SCR en una caldera convencional.



Aplicación del SCR a los HRSG.

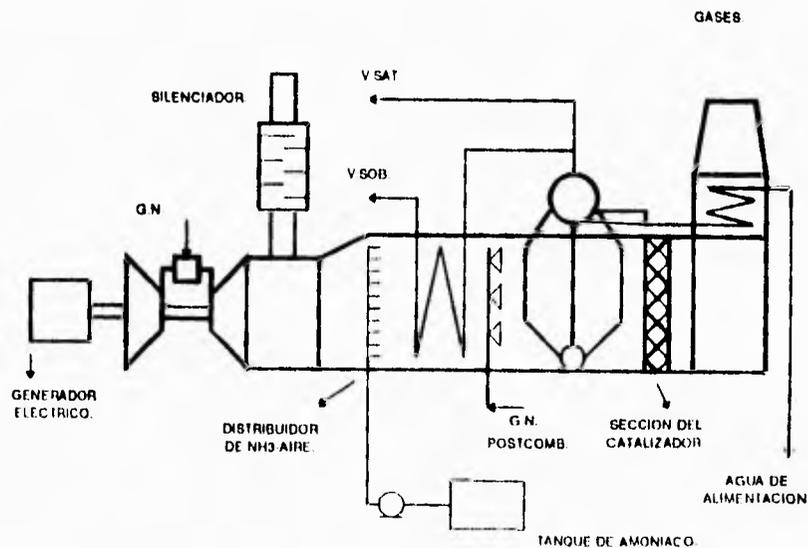
Debido a la aplicación total de la caldera de recuperación (HRSG) en los medios industriales y de generación de energía eléctrica se ha tenido que diseñar estas con el SCR integrado, sobre todo para su aplicación en lugares donde las normas ambientales son muy estrictas y se deben tener emisiones de NO_x entre 3 y 10 ppm.

El equipo tiene el mismo funcionamiento que el SCR que opera en una caldera convencional pero se deben tomar a consideración los siguientes puntos:

1. El diseño debe localizar el punto óptimo de inyección de amoníaco sin intervenir en la generación de vapor a las condiciones requeridas.
2. La inyección no debe interferir con el sistema de remoción de CO.
3. Debe permitir el posterior mantenimiento.

El equipo puede contar hasta con tres distribuidores de amoníaco y la sección del catalizador se encuentra siempre hasta después del último inyector o distribuidor de NH_3 como se muestra en la siguiente figura.

Figura 5.11 SCR integrado a una caldera de recuperación (HRSG).



Al aplicar el equipo de Reducción catalítica, se deben de hacer algunas consideraciones en los siguientes puntos: 1) naturaleza del gas de combustión, 2) condiciones de operación de la fuente de producción de gases de combustión y 3) características del equipo de reducción corriente abajo.

La concentración de polvo en la combustión de gas de aceite de coque ocupa $3\text{g}/\text{Nm}^3$, una décima parte menor en comparación con el carbón aparentemente igual que el combustóleo.

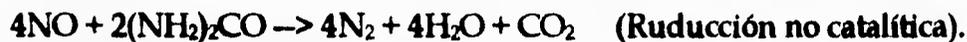
Se puede obtener una buena combustión y prevenir la obstrucción y la abrasión de las camas catalíticas al disminuir la producción de polvo.

El SO_3 en el gas y los residuos de NH_3 se combinan químicamente y se transforman en sulfatos de ácido de amonio (NH_4SO_4). La concentración del NH_3 residual se debe mantener entre 3-4 ppm debido a que éstas causan la obstrucción del calentador de aire-gas corriente abajo del equipo de reducción catalítica o denitrificación.

Se debe prestar atención cuando los poros del catalizador se obstruyen debido a los sulfatos de ácido de amonio (NH_4SO_4) cuando se denitrifican a una baja temperatura de los gases de escape.

B).-Reducción no catalítica.

Se inyectan reductores tales como el gas de amoníaco o soluciones de urea [$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$] al gas caliente para reducir los NO_x a N_2 sin catalizador.



La eficiencia de la reducción del NO_x normalmente varia entre 30 y 50%, la temperatura óptima para la reacción va de $900\text{-}950\text{ }^\circ\text{C}$; a temperaturas superiores a $1000\text{ }^\circ\text{C}$, parte del NH_3 se oxida en NO . El tiempo de residencia del flujo de gas no debe ser mayor a 4 segundos.

Gran parte del amoníaco sin reaccionar restante se combina con óxidos de azufre en el flujo de gas para formar sulfato de amonio hidrogenado (NH_4HSO_4), el cual se deposita dentro del cambiador de aire.

C).-Método de adsorción de coque activado.

Este consiste en la utilización de carbono activado para adsorber los NO_x ya que tiene una alta tasa y capacidad de adsorción comparado con otros materiales, pero el principal problema se presenta al tratar de regenerar dicho material y además tiene el inconveniente de presentar alto riesgo de incendio y explosión ya que el O_2 es abundante.

El óxido de manganeso y los óxidos férricos alcalinizados tienen estas cualidades físicas, aunque la atracción del sorbente es un importante obstáculo tecnológico.

En resumen los métodos de reducción catalítica, recirculación de gases y en general las tecnologías de postcombustión aplicadas a los gases de escape pueden ofrecer medios limitados para la reducción de las emisiones de NO_x procedentes de las fuentes estacionarias, sobre todo cuando se manejan grandes volúmenes de gases, ya que implican gastos en equipos secundarios como ductos y equipos de control. Si el equipo utilizado es un catalizador se requiere de mantenimiento especial el cual es costoso, esto a originado que las tendencias actuales de diseño e investigación están encaminadas a mejorar los métodos y tecnologías en la misma combustión, perfeccionando los quemadores y cámaras de los equipos.

5.3 TECNOLOGIAS PARA LA REDUCCION DE NO_x EN MOTORES DIESEL Y TURBINAS DE GAS.

Motores diesel.

Las tecnologías para la reducción de NO_x en los motores diesel se pueden dividir en métodos primarios y secundarios. Los primeros implican modificar la combustión dentro de las propias cámaras de combustión, mientras que los segundos generalmente se basan en las tecnologías de reducción como es la aplicación del SCR.

Las emisiones contaminantes de los motores diesel son en general :

- 1) olores.
- 2) humo.
- 3) monóxido de carbono.
- 4) hidrocarburos no quemados.
- 5) óxidos de nitrógeno.
- 6) ruido.

Todas las emisiones anteriores además, son función de las siguientes variables de diseño del motor, condiciones externas y combustible :

- 1) Diseño de la cámara de combustión.
- 2) Diseño del inyector de combustible.
- 3) Composición del combustible incluyendo aditivos.
- 4) Relación aire-combustible y relación de compresión.
- 5) Tipo de motor, de aspiración natural o de sobrecarga.
- 6) Condición del motor.

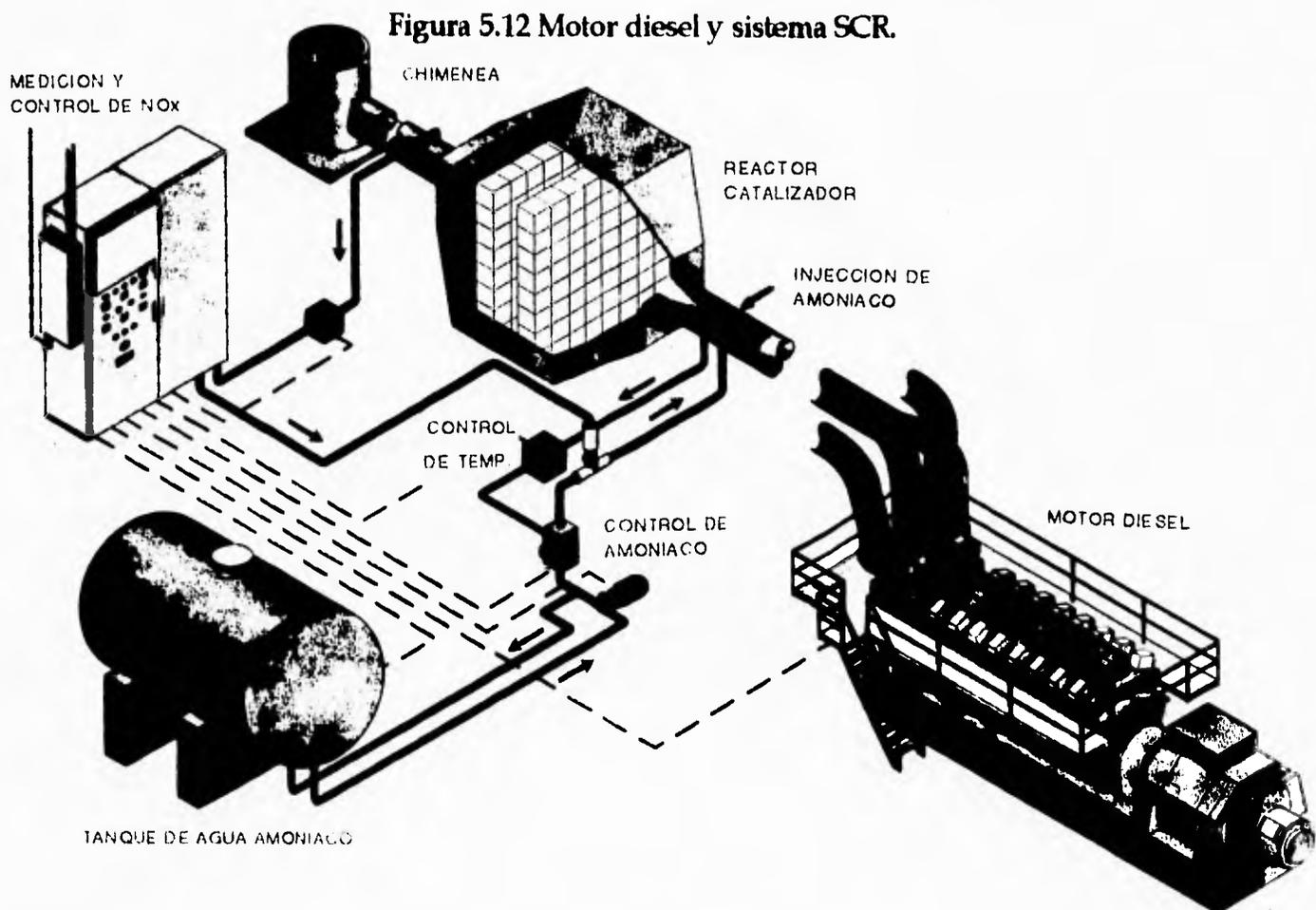
En los motores diesel es importante cambiar cuando menos uno de los tres factores más influyentes, para reducir las emisiones de NO_x :

- i) Reducir la cantidad de oxígeno o de nitrógeno disponible
- ii) Reducir las temperaturas pico en las zonas críticas con suficiente oxígeno.
- iii) Reducir el tiempo de residencia por encima de los 1527°C .

La tecnología de postcombustión más aplicada en los motores diesel para la reducción de óxidos de nitrógeno esta representada por los equipos de reducción catalítica (SCR, los cuales son los mismos y están dispuestos en manera semejante a los de una caldera convencional) debido a los siguientes aspectos:

1. Experiencia en numerosas plantas de cogeneración donde se han aplicado los sistemas SCR.
2. El sistema puede ser aplicado a motores diesel operando con toda clase de combustibles, incluyendo combustóleo.
3. Los precios de los convertidores catalíticos son aceptables.

La siguiente figura muestra el arreglo de un motor diesel con un sistema SCR.



En lo que respecta a los métodos primarios para la reducción de NO_x en los motores diesel se tienen las siguientes medidas:

1. Velocidad máxima: como las emisiones dependen no solo de la temperatura en la combustión, si no también del tiempo de residencia de los gases en las cámaras, es recomendable trabajar los motores diesel a máximas velocidades, para obtener importantes reducciones de emisiones al desalojarse más rápido los gases de las cámaras.
2. Inyección retardada.
3. Control de humedad del aire.
4. Sistema de recirculación de gases de combustión.

Las consideraciones generales que se deben tomar en cuenta para la reducción de los NO_x en los motores diesel y también en otras fuentes fijas son los parámetros externos que son :

a) Condiciones ambientales.

- 1- humedad absoluta del aire.
- 2- presión atmosférica.
- 3- temperatura ambiente.

b) Calidad del combustible.

- 1- calidad de ignición.
- 2- contenido de nitrógeno.
- 3- viscosidad.

c) Carga de trabajo.

Las emisiones de un motor diesel contienen menos CO y HC y más NO_x , humo y partículas compuestas principalmente de hollín y HC no quemados, comparado con los gases de escape de un motor de gasolina.

Para disminuir los NO_x , humo y partículas de los gases de escape del motor diesel, se han hecho varios intentos para modificar los procesos de combustión y para mejorar las cámaras de combustión, sin embargo cuando se disminuye la relación de aire para reducir la emisión de NO_x , algunas emisiones se aceleran infortunadamente.

La reducción catalítica o EGR usada actualmente para motores de gasolina, no se pueden aplicar a motores diesel, pero mientras la emisión de una fuente móvil es de 1/4 del de una fuente estacionaria en la ciudades, el 80% del NO_x presente en la atmósfera urbana se atribuye a fuentes móviles.

Turbinas de gas.

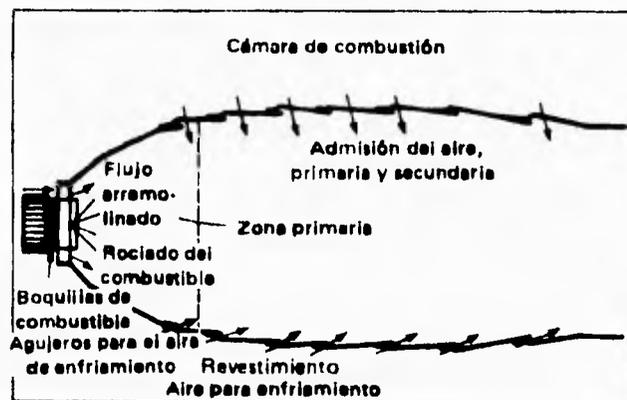
El desarrollo y perfeccionamiento de las Turbinas de gas en las últimas décadas a traído consigo grandes ventajas para su aplicación debido a los nuevos sistemas de enfriamiento y a la tecnología de materiales aplicadas para mejorar las funciones tanto de la cámara de combustión como la de los alabes de la turbina.

Así ya sea una turbina para la generación eléctrica o industrial, estas tendrán un buen rendimiento (actualmente hasta 41 %). Otra ventaja se debe al hecho de ser un equipo en el cual se usa gas natural (bajo contenido de nitrógeno) y se opera a un alto exceso de aire, dando como resultado menores emisiones de CO, cero óxidos de azufre y compuestos de hidrocarburos , además de una considerable disminución de NO_x comparada con las emisiones de una caldera convencional operando con gas natural.

Aun con la reducción natural de contaminantes que trae consigo la turbina de gas, existen dos importantes desarrollos tecnológicos que reducen aun más las emisiones de NO_x y son los quemadores de bajo NO_x y la inyección de vapor a la cámara de combustión de la turbina (aplicación del ciclo Cheng).

Las cámaras de combustión de las turbinas de gas estacionarias o aeroderivadas son similares en operación, así como el tipo de emisiones contaminantes, en la figura siguiente se puede observar el flujo en una cámara de combustión.

Figura 5.13 Cámara de combustión de una turbina de gas.

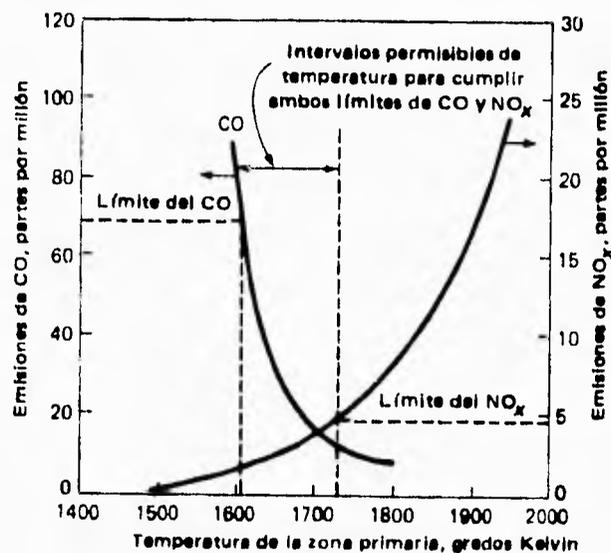


Consideraciones para la reducción de NO_x en la turbina de gas.

La temperatura es el factor dominante en la formación de NO_x en los combustores de las turbinas de gas, pero el tiempo de residencia es también otra importante variable. No es eficaz disminuir la temperatura promedio de los gases, es esencial que se eliminen también los puntos calientes en la zona de combustión. Entre los aspectos generales para disminuir los NO_x en una turbina de gas mediante la operación encontramos los indicadores 1 y 2 y mediante el diseño y modificación del combustor los puntos 3 y 4 siguientes:

1. Operar con una zona primaria pobre: este método de operación tiende a hacer bajar la temperatura, pero, al mismo tiempo, aumentar las emisiones de CO y los hidrocarburos, y disminuir el humo ver gráfica 5.8

Gráfica 5.8 Influencia de la temperatura en la emisión de CO y NO_x en la zona primaria de combustión de una turbina de gas.



2. Operar con una zona primaria rica: este enfoque reduce el aire, y especialmente el oxígeno, que está disponible en la oxidación del nitrógeno atmosférico. No obstante, el método tiene un interés teórico, no es práctico debido al rendimiento del combustible y al aumento del humo.

3. Reducir el volumen de la zona primaria: lo que reduce el tiempo de residencia a altas temperaturas.

4. Aumentar la caída de presión en el revestimiento: este enfoque tiende a aumentar la turbulencia dentro del combustor y a reducir los puntos calientes locales, pero aumenta el consumo de combustible.

A) Modificación de la combustión en Turbinas de Gas.

Los diseños de las turbinas de gas en la actualidad y más específicamente el diseño y fabricación de la cámaras de combustión y quemadores han tenido gran atención.

A igual que los demás métodos para el control de la combustión los referentes, a los quemadores y cámaras de combustión tratan de afinar estos de tal manera que se obtenga el punto óptimo de combustión, generando el mínimo de NO y CO principalmente, ya que al tratar de conciliar con las condiciones para la mínima generación de uno, se incrementa en el otro y además el rango en donde se encuentran las condiciones óptimas es muy limitado ya que se encuentra entre los 1610 y 1730 °K como se ve en la gráfica 5.8.

Combustión en tres etapas:

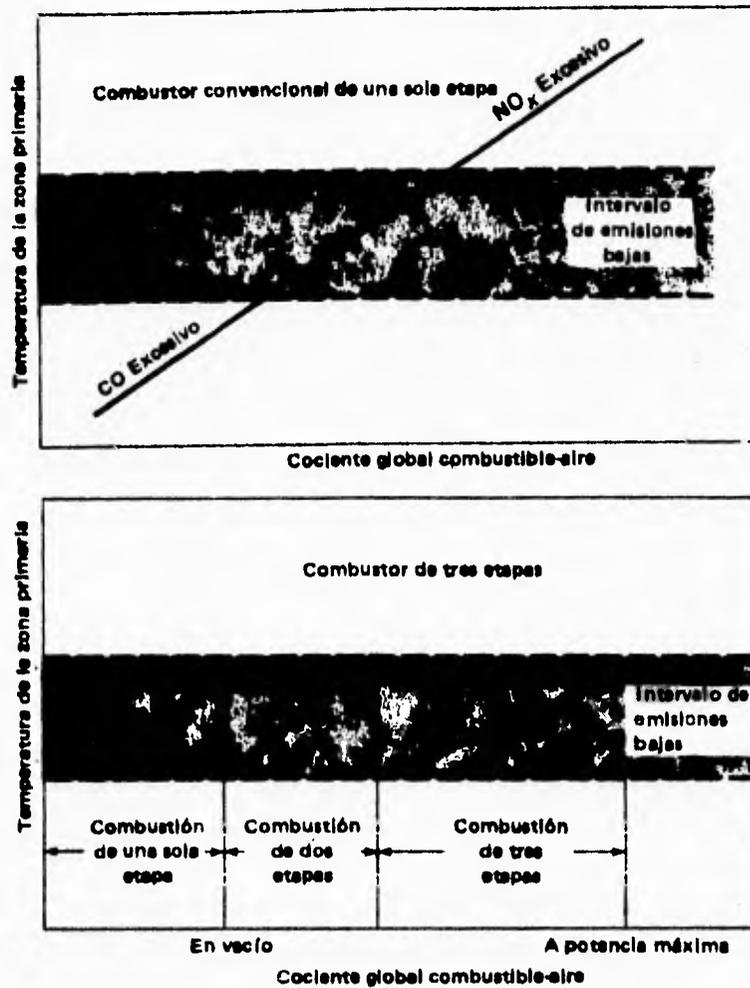
En la combustión de una etapa para una turbina de gas se manifiesta que si las relaciones entre el combustible y el aire son bajas conducirán a temperaturas bajas en la zona primaria de combustión y con ello la formación excesiva de CO, ahora por otra parte si en el mismo en el rango de operaciones tenemos relaciones altas de combustible-aire esto se traducirá en altas temperaturas en la zona primaria y por tanto excesivas emisiones de NO_x.

Por lo tanto el rango de emisiones bajas se encuentra en un intervalo restringido por la temperatura en zona primaria o de la relación combustible y aire. A partir de aquí se ha dado la tendencia en el diseño de combustores para mantener a los gases en los intervalos de interés el tiempo requerido.

El combustor en tres etapas logra mantener emisiones bajas tanto de CO como de NO_x al trabajar en el rango de temperatura o de la relación combustible y aire (c/a) adecuada, en este combustor se realiza la inyección de combustible en tres etapas en donde se emplean varios inyectores colocados en diversas posiciones axiales con el fin de mantener una temperatura y/o la relación c/a en cada zona del combustor propicia.

La posibilidad de variación de inyección de combustible y por lo tanto de la relación c/a da una mayor flexibilidad de operación de la turbina.

Figura 5.14 Comparación entre las emisiones de la combustión en una y tres etapas de una turbina de gas



B) Inyección de aire secundario:

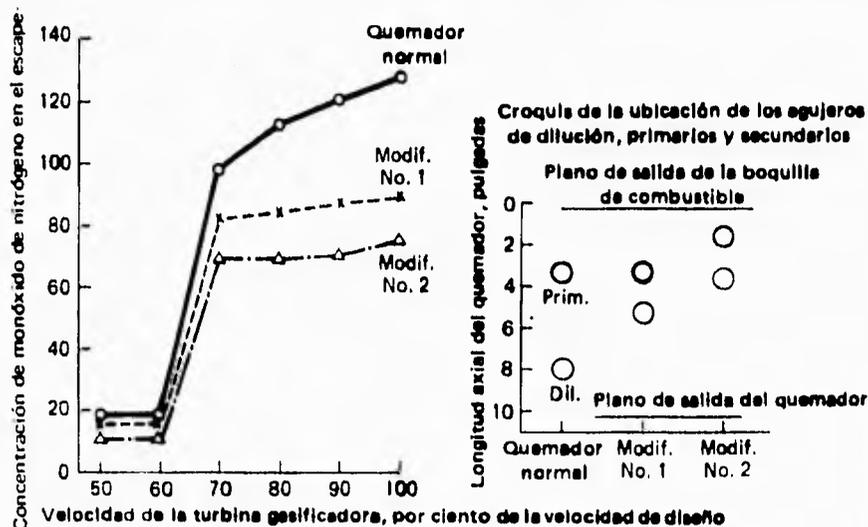
La inyección de aire secundario reduce la temperatura y el tiempo de residencia en las zonas críticas del combustor bajando considerablemente la formación de NO_x.

Si se modifica la distancia de inyección del aire a partir del plano de inyección de la boquilla de combustible se obtendrán significativos avances en la reducción tanto de temperatura como de tiempo.

Por ejemplo si se adelantan los orificios de inyección de aire primario y secundario se pueden obtener reducciones importantes en el tiempo de residencia.

La siguiente gráfica muestra resultados sobre dos modificaciones en el combustor comparados contra un quemador normal utilizando la inyección de aire en una turbina de gas.

Gráfica 5.9 Efecto de la localización de los orificios de inyección del aire secundario en la emisión de NO en el combustor de una turbina de gas.



En la modificación 1 se mantiene la posición de los orificios de aire primario, mientras que los orificios de aire secundario se adelantaron $2 \frac{3}{4}$ de pulgada en la dirección de la boquilla del combustible y como resultado se obtiene una reducción del 34 % en la zona primaria.

En la modificación 2 tanto los orificios de aire primario como los secundarios se adelantaron $1 \frac{3}{4}$ pulgadas y como resultado se produjo una reducción del 44 % en el tiempo de residencia en el combustor normal.

C) Inyección de vapor o Ciclo Cheng:

La inyección de vapor o Ciclo Cheng implica la utilización de una planta de cogeneración simple, o sea una turbina de gas y una caldera convencional o de recuperación (HRSG) por lo que este método de reducción es aplicable solo cuando se cuente con estos equipos y que la turbina permita la inyección de vapor.

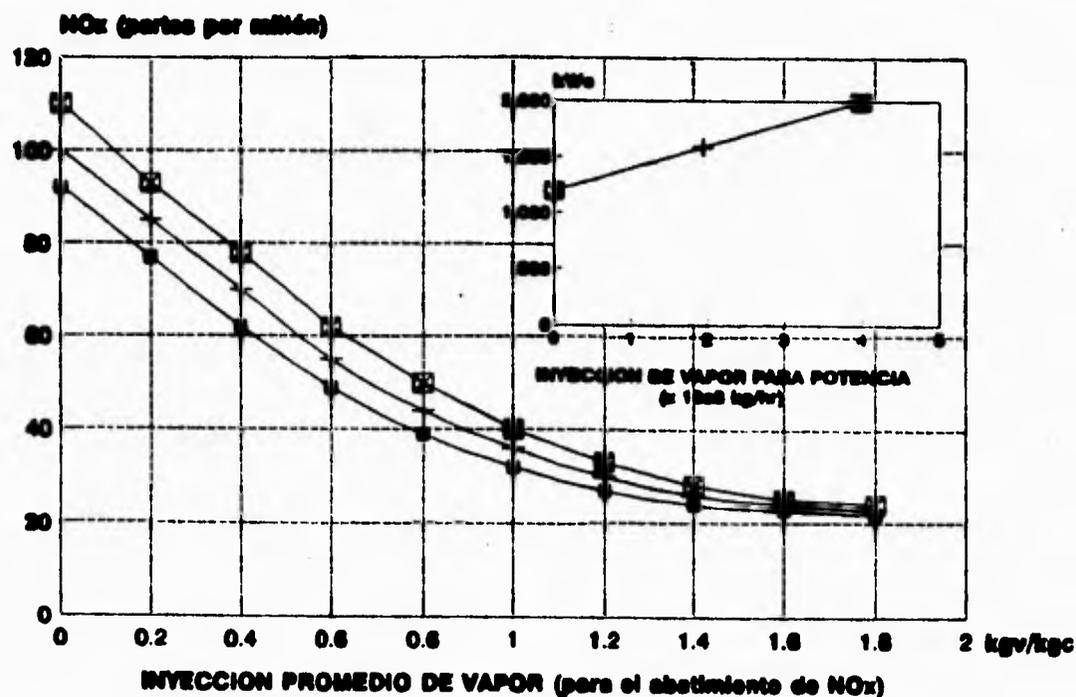
La aplicación del ciclo Cheng como método para el control de emisiones de NO_x permite simultáneamente dos aspectos importantes:

1) Reducción de las emisiones de NO_x .

Mediante la inyección de vapor sobrecalentado a alta presión en la cámara de combustión por medio de una tobera y un control de flujo (regulación de la combustión para evitar la inestabilidad en la flama) se logran reducir las emisiones de NO_x hasta 20 ppm en los gases de salida.

A continuación se muestran los resultados de la inyección de vapor para diferentes incrementos de masa en la emisión de NO_x .

Gráfica 5.10 Reducción de emisiones de NO_x en turbinas de gas por inyección de vapor.



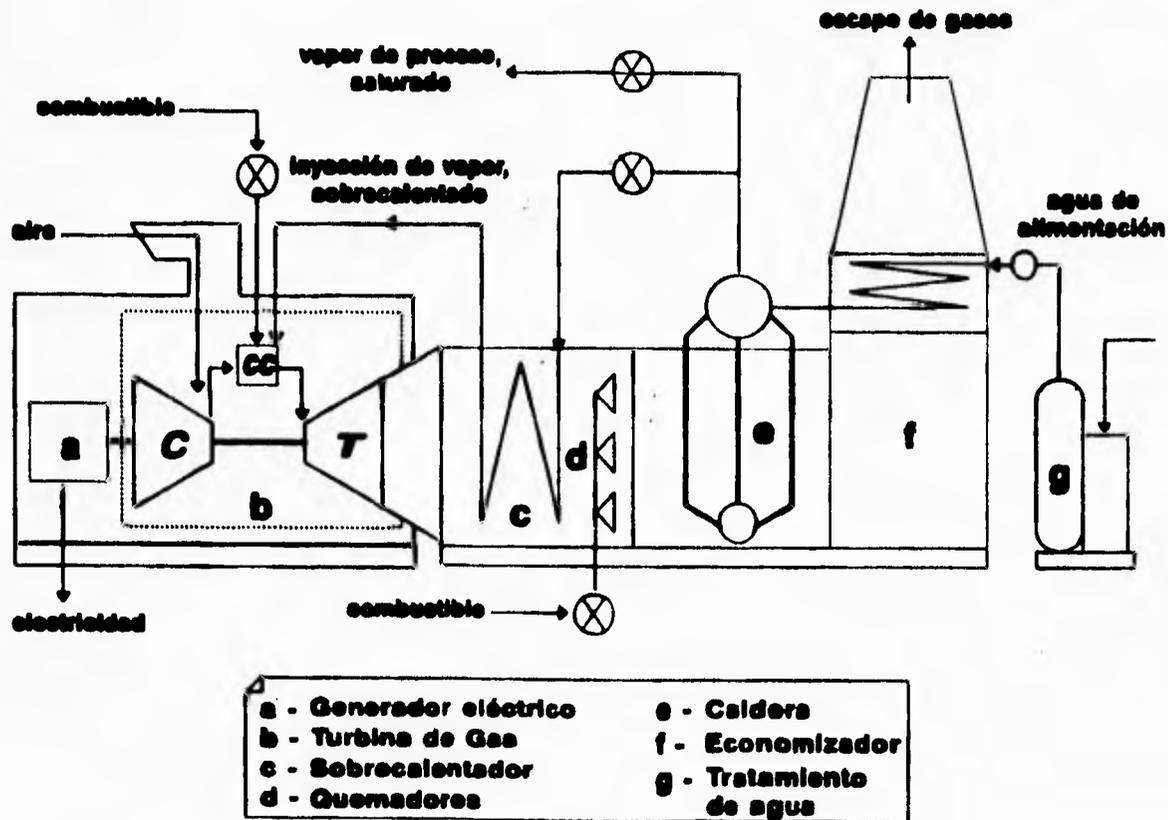
2) Incremento de la eficiencia en la turbina.

Al aplicar la inyección de vapor sobrecalentado (con un límite mínimo de presión de 20 bar.) en la zona inicial de la turbina se obtiene una mayor potencia de salida, al incrementarse la masa o flujo másico que se involucra en la transformación de energía.

La utilización del ciclo Cheng en la generación de potencia es frecuente, sobre todo en las instalaciones de Ciclo combinado donde se tiene disponibilidad de vapor sobrecalentado y es utilizado principalmente para la reducción de NO y para el incremento de potencia (la cual puede ser incrementada hasta en un 10 %).

En cuanto a la aplicación de este ciclo en la industria, también se logran ventajas importantes como es la amplia capacidad de absorción de fluctuaciones de cargas térmicas y eléctricas sin desperdicio de energía, esto representa un gran control para los excedentes que las industrias presentan. El siguiente esquema presenta la inyección de vapor a la cámara de combustión de una turbina de gas.

Figura 5.15 Inyección de vapor a la cámara de combustión de una turbina de gas o ciclo Cheng.



6.- DESULFURIZACION DE GASES DE ESCAPE

6.1.- CONSIDERACIONES IMPORTANTES.

Los óxidos de azufre (SO_x) se forman al quemar combustible que contiene azufre. Una de las formas para prevenir la contaminación por SO_x es usando combustibles con bajo contenido de azufre, tales como el gas natural, gas de carbón desulfurizado (gas producido por la destilación seca del carbón), kerosina (aceite refinado; el contenido de compuestos-S es extremadamente bajo), GNL (Gas natural licuado) y GLP (gas de petróleo licuado). En caso de que no se encuentren en existencia tales combustibles, se pueden hacer alternativamente las siguientes aproximaciones:

1. Usar petróleo crudo o carbón que contenga menos azufre.
2. Usar combustibles desulfurizados tales como el aceite crudo hidrogenado o el carbón lavado.
3. Eliminar los contaminantes del flujo de gas por desulfurización seca/húmeda.

Existe una amplia gama de procesos para controlar las emisiones de bióxido de azufre. Las consideraciones geográficas, las económicas y otras, gobiernan los criterios de selección y aplicación de cada uno de estos procesos. Los procesos propuestos para uso comercial entre los 80's y los 90's se pueden clasificar como (altos, medios o bajos) con respecto a las consideraciones en las tablas 6.1 y 6.2.

PROCESOS	PROCESOS CON RESPECTO A COSTO Y DESEMPEÑO				
	CRITERIOS*				
	Costos de oper.	Costo de capital.	Remoción de SO_2	Confiabilidad.	Uso comercial.
Caliza					
Oxid. natural	M	M	M	M	A
Oxid. forzada	M	M	M	M	A
MgO-cal.	M	M	A	A	A
Cal alta en calcio	M	M	M	M	M
Dual-alkali					
Cal	M	M	A	A	M
Caliza	B	M	A	-	-
Depuración seca	A	M	B	A	A
LIMB	M	B	B	-	-
Inyección seca	M	B	B	-	-
Wellman-Lord	A	A	A	M	M
MgO Regenerativo	M	A	A	M	L
Dowa	M	M	M	H	L
Carbonato acuoso	A	A	M	-	-
Sulf-X	M	A	M	-	-

*A = ALTO, M = MEDIO, B = BAJO

Tabla 6.1

PROCESOS CON RESPECTO A FLEXIBILIDAD DE APLICACION.					
PROCESOS	CRITERIOS*				
	Alto azufre.	Bajo azufre.	Facilidad de retroalimentación	Manejo de desechos.	Remoción de SO ₂ /NO _x .
Caliza					
Oxid. natural	A	A	M	B	B
Oxid. forzada	A	M	M	B	B
MgO-Cal.	A	B	M	B	M
Cal alta en calcio	A	M	M	B	B
Dual-alkali					
Cal	A	B	M	B	M
Caliza	A	B	M	B	B
Depuración seca	M	A	M	M	M
LIMB	B	A	A	M	M
Inyección seca	B	A	A	B	B
Wellman-Lord	A	B	B	M	M
MgO regenerable	A	M	M	A	M
Dowa	A	M	M	M	M
Carbonato acuoso	A	M	M	A	B
Sulf-X	A	M	M	A	A

*A = ALTO, M = MEDIO, B = BAJO

Tabla 6.2.

CONSIDERACIONES GEOGRAFICAS

En las plantas con combustión de carbón sub-bituminoso de bajo azufre, de carbón de alto contenido de azufre y de lignitas, se han instalado sistemas de caliza húmeda para desulfurización. La caliza es una materia prima muy abundante, con reservas en muchas áreas del mundo y su uso en procesos FGD (Flue Gas Desulfurization) es muy económico en lugares cercanos a dichos depósitos.

CONSIDERACIONES ECONOMICAS.

La base principal para la selección y aplicación de los sistemas FGD, es la minimización de los costos iniciales y la facilidad de operación de los diferentes sistemas.

- Concentraciones de carbón sulfurado: Con carbón de alto azufre, los procesos en los que intervienen regeneradores de bajo costo, tales como la caliza, generalmente son atractivos.

- **Volumen de desperdicios sólidos:** En plantas con combustión de carbón bituminoso, los procesos tales como el de oxidación forzada con caliza, mejoran las características del desperdicio sólido y ofrecen medios de manejo y de disposición de éste desecho más versátiles y simples.
- **Tamaño de la caldera:** el proceso con regenerador de carbonato de sodio con depuradores de bajo costo, es apropiado para calderas de tamaño relativamente pequeñas, ya que generalmente se puede disponer del desecho en su totalidad como un efluente líquido.

En una evaluación económica de los procesos FGD disponibles, se desarrolló un análisis comparativo de los costos de las barras de estandarización en diciembre de 1982 para remoción de SO₂ (los costos adicionales para producir energía como resultado del sistema FGD) para dos nuevas unidades generadoras de 500 MW.

Para sistemas sin regeneración de desperdicios con combustión de carbón de alto contenido de azufre (4%), los costos de la barra de estandarización en millones por kilowatt-hora fueron los siguientes: Oxidación-natural con caliza, 18; Oxidación-forzada con caliza, 16; Oxidación natural con cal, 20; Cal dual-alkali, 17; y Caliza dual-alkali, 16.

Para sistemas regenerativos con carbón de alto contenido de azufre, los costos de las barras de estandarización, en millones por kilowatt-hora fueron los siguientes; Wellman-Lord, 26; MgO, 19; Dowa, 16; Carbonato acuoso, 30; Sulf-x, 20.

Para los sistemas sin regeneración de desechos con combustión de carbón con bajo contenido de azufre (1%), los costos en millones por kilowatt-hora fueron los siguientes; Oxidación -natural con caliza, 8; Depuración seca con cal, 7.5; Inyección seca con nahcolite, 8; inyección seca con trona, 7.

6.2.- DESULFURIZACION HUMEDA.

Al quemar el combustible, el azufre en el combustible se oxida como se muestra en la siguiente ecuación.



Dependiendo de las condiciones, del 1 - 5% del SO₂ normalmente se oxida formando SO₃.

El bióxido de azufre y el trióxido de azufre son óxidos ácidos. Se deben neutralizar con bases alcalinas para extraerlos.

Las siguientes bases alcalinas se usan en el proceso de desulfurización-húmeda.

Iones metálicos alcalinos Na^+ , K^+

Iones metálicos de arcillas alcalinas Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+}

Iones de amoníaco NH_4^+

Los métodos de desulfurización en tubos de gas se seleccionan en base a las siguientes condiciones:

1. Costo del absorbente
2. Eficiencia energética
3. Estabilidad en la operación a largo plazo
4. Adaptabilidad (operatividad) a cambios en el volumen de gas, concentración de SO_2 y otros factores.
5. Facilidad de colocar en el mercado los subproductos.

La concentración de SO_2 en los tubos de humo de las calderas de plantas de potencia es en general de 700 a 3000 ppm, sin embargo, esto depende del tipo de combustible. La desulfurización es, prácticamente hablando, la remoción de los restos de SO_2 , solo del 3/1000 a 1/1000 del volumen total de gas.

SISTEMAS FGD HÚMEDOS SIN GENERACION DE SUBPRODUCTOS.

La aplicación más común de desulfurización de gases de escape en países desarrollados sigue siendo, a través del uso de sistemas que contienen colectores húmedos que depuran y saturan de humedad la corriente de gas, resultando un desperdicio sulfuroso sólido que es desechado.

Depuración por medio de cal y piedra caliza.

Los regeneradores alcalinos de cal o piedra caliza se usan comúnmente en sistemas con depuradores de mezclas húmedas para absorber SO_2 y para producir una masa de desecho sólido de base de calcio.

PROCESO DE PIEDRA CALIZA.

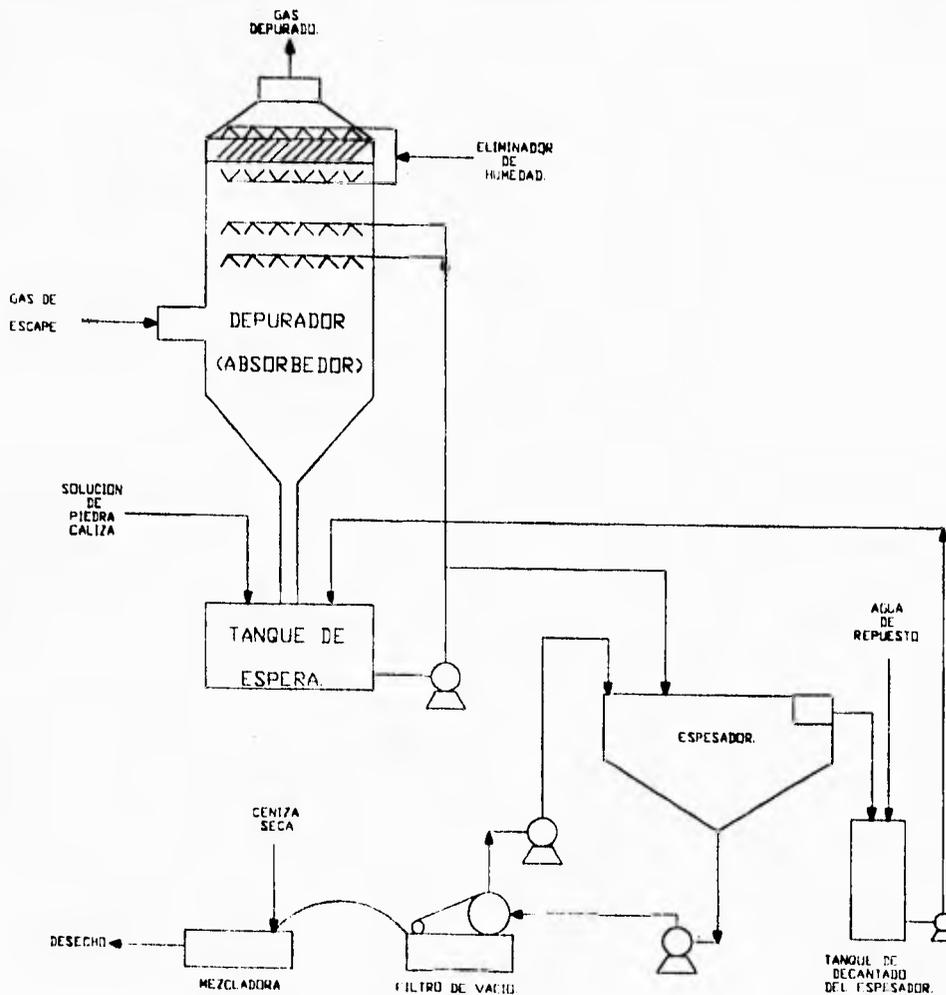
En este proceso, una mezcla de un producto de reacción de SO_2 precipitado y piedra caliza se pone en circulación, generalmente en una torre de rociado, para absorber SO_2 y convertirlo en un desperdicio sólido de sulfato/sulfito de calcio.

Descripción del Sistema.

Procesos FGD de oxidación natural o forzada. En el primero, el proceso más comúnmente seleccionado en los Estados Unidos en los 70's, el producto se convierte en su mayoría en sólidos de sulfito de calcio acompañados por sulfato de calcio, este último es formado por la oxidación del sulfito con el oxígeno contenido en el gas a la entrada del equipo.

En la figura 6.1, el gas de escape sin polvo se mezcla a contra corriente con una mezcla de sulfito de calcio, sulfato de calcio y sólidos de piedra caliza (carbonato de calcio) para absorber SO_2 , formando sulfito y sulfato disueltos, parte del cual, se precipita en el absorbedor para formar sólidos suspendidos. La mezcla de depuración de la suspensión de partículas se separa del gas depurado antes de descargarlo en la chimenea.

Figura 6.1



El producto resultante del sulfito disuelto y del sulfato creado en la etapa de absorción, reacciona con la alimentación de la piedra caliza reactiva regeneradora en el tanque de retención de desperdicios, reduciendo el calcio disuelto y el sulfato a un nivel bajo de supersaturación y precipitando un desperdicio adicional del producto de reacción. Los sólidos suspendidos en la corriente del exudado del ciclo de recirculación de la mezcla se desechan generalmente después de un decantado primario en un espesador, seguido por un decantado final en un filtro de vacío. El decantado prepara a los sólidos para la estabilización al intermezclarlos con ceniza seca para lograr un control óptimo de la contaminación del agua para uso en tierras.

En el proceso de **oxidación forzada (FO) FGD**, comúnmente seleccionado en los Estados Unidos durante los 80's por encima del proceso de oxidación natural (NO), se introduce aire comprimido al sistema para obtener desperdicio sólido como yeso (sulfato de calcio) o como una masa parecida al yeso que tiene mejor sedimentación, filtrado y propiedades estructurales o físicas que los sólidos predominantemente de sulfito de calcio. Como se muestra en la figura 6.2, un tanque de oxidación se interpone entre la salida del absorbedor de la mezcla y el tanque de recirculación, el aire comprimido contacta a la mezcla en un punto de bajo pH del sistema, donde la solubilidad del sulfito de calcio y la reacción con el oxígeno son mayores. Los sólidos de yeso pueden ser decantados en forma de pasta filtrada para usos agrícolas, o la corriente del exudado del depurador puede ser bombeada directamente al sitio de uso, usando un método de chimenea húmeda similar al usado en la industria de fertilizante de fosfato.

Ventajas y Desventajas.

Los sistemas ofrecen simpleza comparativa a un costo relativamente bajo. En el caso de FO, se puede adaptar fácilmente ya sea a un proceso con o sin uso de subproductos. El uso creciente de aditivos ácidos orgánicos para solubilizar el regenerador de piedra caliza, mejora substancialmente la remoción del SO_2 y ofrece mejoras potenciales económicas en el diseño de sistemas.

Una evaluación reciente de depuraciones para mezclas con piedra caliza alternativas para plantas de alto azufre, indica los siguientes costos estandarizados en millones por kilowatt-hora: operación sin estancamiento de desperdicio, 14.42; FO con desperdicio desechado como pasta filtrada, 15.08; y FO con aditivo ácido adípico, 13.31.

Generalmente los sistemas de depuración de mezclas de piedra caliza, operando en un modo supersaturado de CaSO_4 con alcalinidad limitada de sulfito soluble, han tenido mayor operación y manteniendo los niveles de trabajo sin completar, particularmente en aplicaciones con carbón de alto contenido de azufre, donde la disponibilidad típica promedio es menor al 80%.

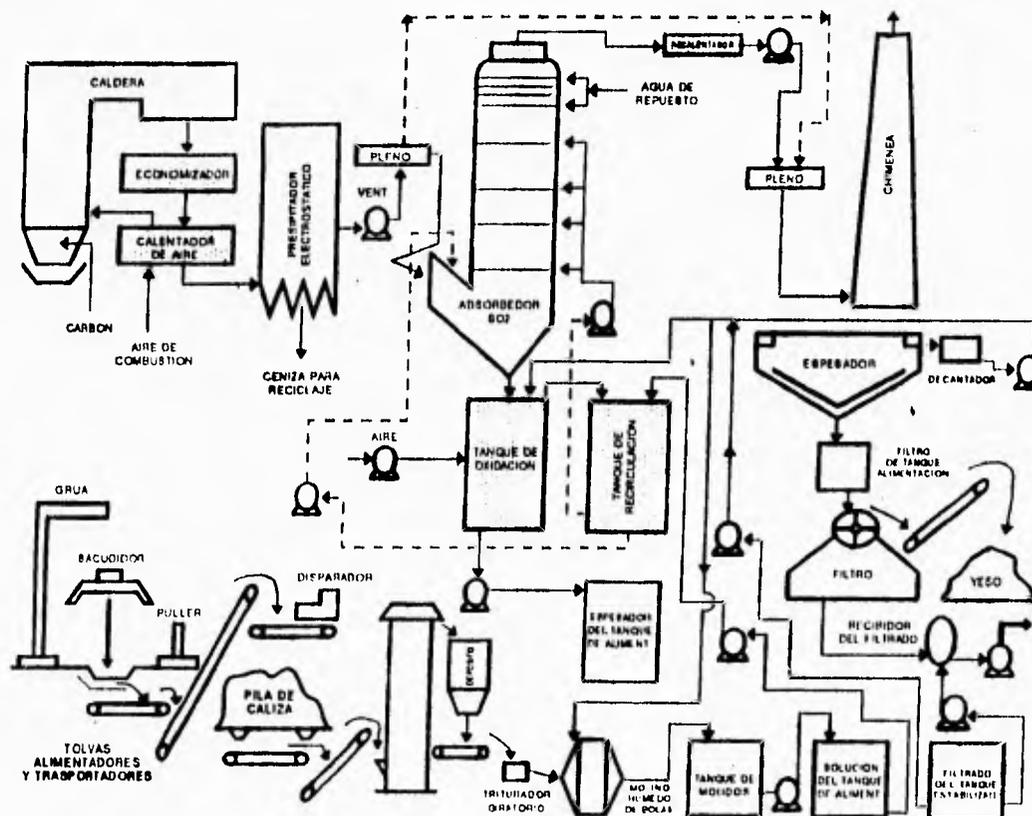


Figura 6.2.

Absorbedor. Las Torres de atomizado, son tanques abiertos en los que una mezcla depuradora se hace pasar por los atomizadores y hace contacto con el flujo de gas. Este equipo se selecciona mayormente para los sistemas de depurado por mezcla. En un diseño conservador, la velocidad del gas de escape se limita a aproximadamente 2.5 m/s para prevenir un excesivo acarreo de mezcla al eliminador de humedad (fig. 6.3). En las torres de atomizado típicas, la presión impartida a la mezcla que descarga de los atomizadores, produce pequeñas gotas de liquido que sirven como sitio de absorción de SO₂.

Por lo general se usan presiones de 103 a 138 KPa en los atomizadores para producir gotas de 2.5 a 4 mm de diámetro. Las gotas que entran dentro de este rango ofrecen suficiente área superficial para absorber SO₂, y los problemas de la suspensión de partículas normalmente asociadas con gotas más pequeñas se minimizan. Se encuentran caídas de presión relativamente bajas en la fase gaseosa, aproximadamente de 250 a 1000 Pa, debido a que la torre de atomizado no tiene más partes internas que bancos de atomizadores.

El número de bancos de rociadores, por los cuales se alimenta la mezcla a los rociadores, varía dependiendo de la carga de SO_2 y de la eficiencia de remoción de SO_2 .

De uno a seis bancos de rociadores se instalan en las torres de sistemas FGD comerciales de rociado de mezcla de piedra caliza para gases producto de la combustión de carbón. Las torres deben incluir suficientes rociadores para crear una zona de densidad uniforme. La ubicación de rociadores para crear un traslape considerable de rocío de solución reduce los problemas asociados con fallas de rociadores, que podrían crear un camino de baja resistencia para el flujo de gas. Los rociadores deben ser fabricados de materiales resistentes a la abrasión, como cerámicos.

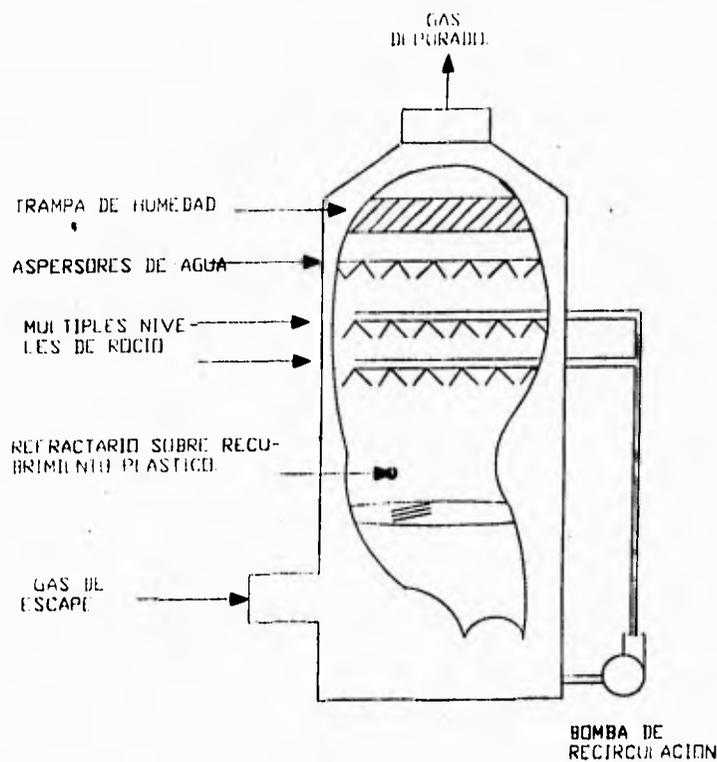


Figura 6.3.

Las relaciones altas de líquido/gas, mejoran la remoción de SO_2 al incrementar el área superficial para transferencia de masa. Además, las relaciones altas de líquido/gas reducen la probabilidad de formación de taponamientos en los depuradores al prevenir cualquier supersaturación instantánea de CaSO_4 mayor al 30% en solubilidades normales.

Tanque de reacción de espera.

Este tanque debe proporcionar suficiente tiempo de espera para disminuir la supersaturación de la solución y de ahí minimizar las obstrucciones en tuberías.

Debe ser un tanque separado o formar la parte inferior del depurador que sirve como reserva. La dimensión de este tanque es un factor crítico de diseño. El tiempo de espera debe ser suficiente para asegurar el uso óptimo de la piedra caliza y la precipitación del yeso. El tiempo de espera esta en función de el grado de supersaturación permitido durante la absorción de SO_2 y del diseño del tanque.

Si el tanque va unido al depurador, éste se debe diseñar para la misma presión. Típicamente, 10 minutos es un tiempo de espera adecuado para asegurar que la cristalización ocurra en el envase abierto en lugar de en la tubería y los bancos de rociadores. El control del contenido de sólidos en la recirculación de la suspensión es esencial para mantener la cantidad de cristales semilla en los cuales se depositará el yeso en el tanque de espera en lugar de las paredes o partes internas del recipiente depurador. Para un depurador libre de cenizas volátiles de piedra caliza, la operación típica normal contiene de 5-15% de sólidos en peso en el tanque de espera.

Oxidadores. En los sistemas FO más comunes, la oxidación se lleva a cabo después de que se suministra aire a una presión de aproximadamente 103 KPa a una red simple de tubos perforados. Se colocan horizontalmente en un tanque cilíndrico vertical de oxidación, que recibe la mezcla de bajo pH del absorbedor. Existen diversos sistemas de oxidación en los que se usan aislantes de aire sumergidos o anillos de rociado con agitadores. Los sistemas se diseñan para mejorar el grado de conversión de sulfito a sulfato y/o eliminar la tendencia de taponamientos en los cabezales.

Eliminadores de humedad. Este sub-sistema se debe diseñar para limitar el acarreo de líquido de proceso del absorbedor.

Al limitar el acarreo se minimizan las incrustaciones y la corrosión en los componentes corriente abajo y se reduce el uso de energía para el recalentamiento del gas de escape. Por experiencia se sabe que es deseable el uso de eliminadores de humedad plásticos como el polyester reforzado con fibra de vidrio.

Recalentamiento del gas de escape. Al recalentar el gas saturado de agua, típicamente a 28°C (aprox.), se asegura que no exista una capa húmeda en la pared interior de la chimenea, previniendo la lluvia de gotas líquidas cuando la velocidad del gas en la chimenea excede los 9 m/s. También reduce la probabilidad de corrosión corriente abajo del recalentador. Hay dos tipos de sistemas:

- El recalentamiento de paso es económicamente atractivo, debido a que se usa energía térmica del gas limpio en vez de gases de escape o vapor.
- El recalentamiento se lleva a cabo en intercambiadores de calor tubulares con agua caliente o vapor. Se requiere un soplado intensivo e intermitente con vapor o aire comprimido en los tubos para evitar obstrucciones y corrosión.

Espesador. El espesador sirve como un instrumento de decantación primario en los procesos de depuración con cal/piedra caliza de oxidación natural. En aplicaciones individuales, la concentración terminal corriente abajo (la concentración de la mezcla debajo de la cuál la masa es un fluido) debe ser calculada con respecto al tamaño de partículas sólidas; en resumen, al disminuir el tamaño, la concentración corriente abajo disminuye. El diseño de la concentración corriente abajo, que influye significativamente al dimensionamiento de las áreas horizontales, se especifica en un nivel de 10 a 15 por ciento debajo de la concentración final.

En la experiencia se ha mostrado que en la depuración por cal estabilizada con magnesio, el área del espesador necesaria para lograr una concentración de corriente abajo de diseño es influenciada importantemente por el contenido de cenizas de los sólidos. En los sistemas de depurado por piedra caliza generalmente se obtiene material más grueso de sedimentación más rápida. Este material no se influencia de manera importante por adición de polímeros.

Ciclones de líquido. Estos se puede usar para un decantado primario, mientras al mismo tiempo se logra la clasificación de sólidos. Las partículas más gruesas se descargan corriente abajo, mientras las fracciones más finas salen con el flujo de gas. Una batería de ciclones clásica puede ser de ciclones de 102 a 381 mm de diámetro, aislados con hule moldeado de alta densidad y alimentados por una cámara central mezcladora para asegurar una distribución uniforme de mezcla con respecto al volumen, la concentración óptima de la alimentación y una distribución uniforme de tamaños de partículas. Los ciclones ofrecen grandes capacidades a bajos costos, son relativamente simples de operar y requieren un espacio mínimo de instalación, pero no ofrecen una corriente de reciclamiento baja en turbiedad.

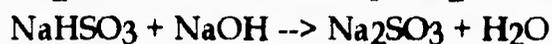
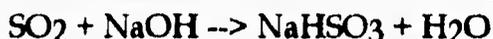
Filtros de vacío. Normalmente los filtros de vacío son los mecanismos más económicos y flexibles para un secado de uso continuo. Se pueden usar tiempos cortos de secado dentro de un amplio rango de concentraciones de sólidos en la alimentación. La unidad de tambor rotatorio, el filtro de vacío más comúnmente usado, decanta de un 20 a un 35 por ciento de sólidos a una pasta que contiene 45-75% de sólidos, produciendo un filtrado que contiene 1.5% aprox. de sólidos suspendidos que se recicla al espesador.

El filtro consiste de un tambor rotatorio parcialmente sumergido en un recipiente de la mezcla a filtrar. La superficie se compone de segmentos de filtro individuales que contienen rejillas de drenado y tubería por medio de la cuál se aplica el vacío a la superficie del filtro, mientras el filtrado se drena a un recolector. La relación de filtración esta en función de la concentración de sólidos en la alimentación, el espesor de la pasta formada y del contenido de humedad de la pasta. Normalmente es menos de 0.014 kg/s.m² para sistemas FGD de piedra caliza y substancialmente mayores que este valores para sistemas de cal.

OTROS PROCESOS HUMEDOS SIN GENERACION DE SUB-PRODUCTOS.

DEPURADO POR SODIO. Desde el inicio de los 70's, se han hecho esfuerzos para desarrollar sistemas de doble álcali de depuración por sodio usando regeneración de piedra caliza. Se ha encontrado que el proceso es técnicamente posible. Por lo tanto, en las actividades de demostración en campo se usa un pH más bajo que en los sistemas de cal regenerada y se limita la fracción de regeneración (el porcentaje de bisulfito en la solución gaseosa de depurado que se regenera) entre 30 y 60%. Una evaluación económica indica que el sistema de doble álcali de piedra caliza regenerada, tiene costos menores en cerca de un 13%, que los sistemas de depurado por piedra caliza con oxidación forzada, principalmente debido a un menor costo de mantenimiento y menor costo de energía. Otras ventajas incluyen la alta disponibilidad, muy baja concentración de partículas, capacidad de carga continua y reducidos requerimientos de espacio disponible.

MÉTODO DE HIDRÓXIDO DE SODIO.

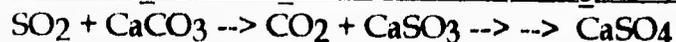
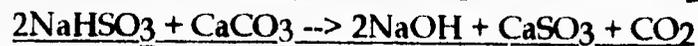


Este método se utiliza para oxidar el Na_2SO_3 finalmente en Na_2SO_4 el cuál es inofensivo. El proceso, al consumir una gran cantidad de NaOH , no es costoso, por lo tanto, se adopta solo en dispositivos pequeños, o si no, en industrias específicas en las cuales el NaHSO_3 y/o Na_2SO_3 se recolecten en un cierto punto del proceso y se reciclen como subproductos. Por ejemplo, la industria del papel que utiliza NaHSO_3 y Na_2SO_3 como decoloradores de papel.

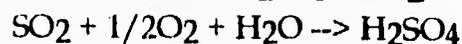
En tal caso, este método es altamente eficiente.

El sulfato de calcio y el ácido sulfúrico se pueden obtener por este método.

1).- Formación del sulfato de calcio.



2).- Formación de ácido sulfúrico.



PROCESO DOWA.

Utilizado comúnmente en Japón en fundidoras y plantas de ácido sulfúrico de contacto, este proceso de doble álcali emplea una solución con un pH de 3 a 3.5 de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (sulfato de aluminio básico) en el circuito de depurado de gas. Se utiliza para uso comercial en calderas con servicio de combustión de carbón. La absorción de SO_2 forma $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_3)_3$ disuelto que en la torre de oxidación externa se convierte en $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y se manda a una posprecipitación de piedra caliza, generando yeso útil y regenerando el reactivo $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Antes que se descargue la purga de cloro del sistema, se trata con un exceso de piedra caliza para precipitar iones de aluminio como hidróxido de aluminio, el cuál se recupera para su reutilización.

El proceso Dowa ofrece una operación de doble álcali de CaSO_4 insaturada y el uso de piedra caliza en vez de cal. Debido a una operación con bajo pH, también se obtiene un nivel extremadamente alto en la utilización de piedra caliza con un mínimo de desperdicio sólido, generalmente un 10% menor al del proceso por piedra caliza con oxidación forzada. Por lo tanto, en plantas con combustión de carbón de alto contenido en azufre, se ha estimado que el proceso Dowa tiene costos de barra de estandarización menores al 10% de los costos de los sistemas de depuración de piedra caliza húmeda con oxidación natural o forzada.

Las principales desventajas son una relación potencialmente alta de líquido de purga y la complejidad del proceso comparándolo con los más sencillos sistemas de depuración por mezclas de piedra caliza.

DEPURACIÓN POR CENIZAS VOLÁTILES. El carbón de algunas minas, algunas veces tiene altos contenidos de álcali (CaO , MgO , Na_2O , y K_2O). Para considerar a las cenizas como un reactivo atractivo en operaciones de depuración por mezcla, algunas veces se sustituye parte o toda la piedra caliza que se requeriría para lograr la remoción de SO_2 . Los metales tales como el hierro y el magnesio se disuelven en una mezcla de depuración recirculada y catalizan la oxidación del SO_2 absorbido, normalmente convirtiendo el 90% del sedimento en sulfato, también reduce la presión del vapor del SO_2 y produce un absorbente de pH bajo poco usual (3.5 a 5), con un buen control interno del escalamiento químico.

Cuando resulta económico, para lograr ciertos niveles de emisiones de partículas o requerimientos de opacidad de la chimenea, se puede instalar un depurador venturi, corriente arriba del absorbedor para recolectar la ceniza y conjuntarla en el sistema de depuración húmedo, por lo tanto la depuración por ceniza cuando es aplicable, tiene ventajas parecidas a la de la oxidación forzada junto con un muy bajo costo de reactivo común. Su costo total puede no ser muy atractivo, a menos que el depurador venturi logre una cierta opacidad con una caída de presión de gas relativamente baja.

DEPURACIÓN CON SOLUCIÓN CLARA. Generalmente este sistema utiliza álcali a base de sodio (carbonato de sodio o hidróxido de sodio) para absorber SO_2 en una solución clara de sulfito, bisulfito y sulfato, (el SO_2 colectado, se desecha como una solución clara, generalmente después de un venteo para convertir el sulfito en sulfato). Este sistema es el medio más común de remoción de SO_2 en calderas industriales pequeñas. La recolección húmeda de ceniza y SO_2 , generalmente se lleva simultáneamente en el depurador venturi, en el que se controla el pH para prevenir la corrosión y para limitar las emisiones de SO_2 a un nivel deseado.

En algunas aplicaciones industriales, los desperdicios de álcali solubles se utilizan para cubrir las necesidades de reactivo de los sistemas FGD. En algunas industrias, incluyendo algunos molinos de pulpa y papel, la solución de sulfito que se obtiene en el FGD se puede recuperar para ser usada en el proceso de la planta.

6.3.- SISTEMAS FGD SECOS SIN GENERACION DE SUB-PRODUCTOS.

Estos sistemas son altamente valiosos en algunos casos, debido a que remueven el SO_2 sin saturar la corriente gaseosa con agua, y producen un desperdicio seco.

DEPURACIÓN SECA.

En estos sistemas, generalmente instalados sin una recolección de polvo anterior en el gas de escape, el gas de escape normalmente hace contacto de escape con una mezcla de cal muerta en un secador de atomizado, recolectando posteriormente el producto de SO_2 junto con la ceniza en un filtro de tela o un precipitador electrostático.

También se han utilizado sistemas de lecho fluidizado con recirculación, principalmente en operaciones de alto contenido de azufre en lugar del secador de atomizado.

Operación del proceso. En este proceso se hace pasar una corriente de gas que contiene ceniza y SO_2 por un absorbedor del tipo del secador de atomizado (fig. 6.4), donde hace contacto con una mezcla finamente atomizada o una solución de alimentación del reactivo. El SO_2 se absorbe en las gotas alcalinas al mismo tiempo que el agua se evapora. Las reacciones que se llevan a cabo son muy parecidas a la depuración por cal húmeda o solución clara.

Los sólidos de sulfito y sulfato que se forman en el secador junto con la ceniza y que exceden al reactivo, salen del secador con el gas depurado y se recolectan ya sea en un precipitador electrostático de alta eficiencia o en un filtro de tela. Una absorción posterior se puede lograr en el colector de polvo. Al recircular una porción de los sólidos colectados a el sistema de alimentación de reactivo se puede mejorar la utilización del reactivo, el secado de los sólidos, y el manejo de la mezcla de

El tamaño del secador de rociado es una función del flujo de gas y de la temperatura de rocío (diferencia entre las temperaturas de entrada y salida). La capacidad del secador debe permitir un mezclado del reactivo con el gas y debe proporcionar un tiempo de residencia adecuado para permitir una alta remoción de SO_2 obteniendo un producto seco (10 segundos nominalmente para un proceso de base de cal).

La diferencia de temperaturas, entre la temperatura de salida del gas de escape y la temperatura de saturación (de bulbo húmedo) es inversamente proporcional a la eficiencia de remoción de SO_2 y al contenido de humedad del desecho sólido. Este gradiente de temperatura generalmente no es menor a 10°C y permite un control de humedad corriente abajo del secador.

En el 90% de las instalaciones de depuración seca, se seleccionan filtros de tela porque contribuyen más a la eficiencia de remoción de SO_2 que los precipitadores electrostáticos, debido a la efectividad de la alcalinidad disponible en los sólidos recolectados en las bolsas. También se prefieren debido a que su funcionamiento es menos sensible a las variaciones de las operaciones de secado.

Los colectores de polvo corriente abajo del secador de rociado operan cerca del punto de rocío y por lo tanto se requiere de un aislamiento adicional para reducir la pérdida de calor y la condensación.

INYECCION DE PIEDRA CALIZA EN UN QUEMADOR DE ETAPAS MULTIPLES.

La evaluación de los sistemas FGD de inyección de piedra caliza seca en los 60's, dieron resultados insatisfactorios debido a la baja remoción de SO_2 (15-50%) y a la pérdida sustancial de alimentación debido a la mala combustión y a una distribución no uniforme. En la práctica también causa otros problemas de operación como pueden ser la obstrucción en las tuberías y el mal funcionamiento de precipitación. El creciente uso de quemadores de bajo NO_x con temperaturas de flama pico reducidas y zonas de la cámara enriquecidas por combustible, han proporcionado medios de mejoramiento para solucionar estas limitaciones y aplicar satisfactoriamente el sistema de FGD de piedra caliza seca al inyectar el absorbente ya sea con aire o con carbón pulverizado.

FUNCIONAMIENTO DE LIMB (limestone injection into a multistage burner).

En la inyección de piedra caliza en las instalaciones de un quemador de etapas múltiples la instalación es comparativamente simple para retroalimentar calderas de combustión de carbón de diferentes tamaño y es bajo en costos comparado con las otras alternativas.

Los resultados de pruebas de incrustaciones en bancos y pilotos indican que la calcinación de la piedra caliza permite un área superficial efectiva de calcio al mismo tiempo mejoraran la colección de SO_2 . Al hacerlo, será posible crear momentáneamente 20m^2 o más de área superficial por gramo de piedra caliza, al maximizar la presencia del área superficial de cal, en parte por seleccionar un tamaño de partículas de alimentación de piedra caliza óptimo, se optimiza el funcionamiento del LIMB.

También se deben tener condiciones de temperatura favorables por aproximadamente un segundo después de la calcinación, o sea, $850\text{-}1300^\circ\text{C}$ en el lugar apropiado de alimentación de piedra caliza. Esta selección se debe hacer para distintos lugares de inyección de aire para la combustión, por ejemplo, aire auxiliar y aire principal o el sitio donde se inyecta el carbón.

Operación del proceso.

En la figura 6.5 se muestra un esquema general del proceso LIMB como se aplicó a finales de los 80's después de demostraciones prácticas. Este sirve como un sistema de control combinado de $\text{NO}_x\text{-SO}_x$ para plantas de potencia con carbón pulverizado. El carbón se quema en quemadores de bajo NO_x para minimizar las emisiones. Las emisiones de SO_x se reducen en combinación con la recolección dentro del hogar y con una limpieza corriente abajo. El absorbente se puede;

- Mezclar con el carbón antes de la pulverización, o mezclarse con el carbón después del cribado y ser alimentado al hogar a través del quemador
- Mezclar con la corriente de combustión (en la etapa secundaria o terciaria de aire) y después ser inyectado en el horno.

La adición del absorbente incrementará la carga total de sólidos en el hogar y también puede causar problemas de incrustamiento y obstrucción. Un colector de polvo corriente abajo del calentador de aire removerá el absorbente, el cuál, podrá ser enviado posteriormente a un contactor húmedo o seco para reducir los contenidos de SO_x .

Ventajas y desventajas.

La mayor ventaja del proceso LIMB es su bajo costo inicial, el cual puede:

- (1) hacerlo factible y atractivo por retroalimentación a las fuentes existentes y
- (2) proveer medios óptimos para una reducción substancial de emisiones de SO_2 en calderas teniendo una vida útil limitada.

Las desventajas incluyen la incertidumbre de su factibilidad para una remoción de alta eficiencia de SO_2 y su posible impacto en el funcionamiento de la caldera.

Los resultados de pruebas de incrustaciones en bancos y pilotos indican que la calcinación de la piedra caliza permite un área superficial efectiva de calcio al mismo tiempo mejoraran la colección de SO_2 . Al hacerlo, será posible crear momentáneamente 20m^2 o más de área superficial por gramo de piedra caliza, al maximizar la presencia del área superficial de cal, en parte por seleccionar un tamaño de partículas de alimentación de piedra caliza óptimo, se optimiza el funcionamiento del LIMB.

También se deben tener condiciones de temperatura favorables por aproximadamente un segundo después de la calcinación, o sea, $850\text{-}1300^\circ\text{C}$ en el lugar apropiado de alimentación de piedra caliza. Esta selección se debe hacer para distintos lugares de inyección de aire para la combustión, por ejemplo, aire auxiliar y aire principal o el sitio donde se inyecta el carbón.

Operación del proceso.

En la figura 6.5 se muestra un esquema general del proceso LIMB como se aplicó a finales de los 80's después de demostraciones prácticas. Este sirve como un sistema de control combinado de $\text{NO}_x\text{-SO}_x$ para plantas de potencia con carbón pulverizado. El carbón se quema en quemadores de bajo NO_x para minimizar las emisiones. Las emisiones de SO_x se reducen en combinación con la recolección dentro del hogar y con una limpieza corriente abajo. El absorbente se puede;

- Mezclar con el carbón antes de la pulverización, o mezclarse con el carbón después del cribado y ser alimentado al hogar a través del quemador
- Mezclar con la corriente de combustión (en la etapa secundaria o terciaria de aire) y después ser inyectado en el horno.

La adición del absorbente incrementará la carga total de sólidos en el hogar y también puede causar problemas de incrustamiento y obstrucción. Un colector de polvo corriente abajo del calentador de aire removerá el absorbente, el cuál, podrá ser enviado posteriormente a un contactor húmedo o seco para reducir los contenidos de SO_x .

Ventajas y desventajas.

La mayor ventaja del proceso LIMB es su bajo costo inicial, el cual puede:

- (1) hacerlo factible y atractivo por retroalimentación a las fuentes existentes y
- (2) proveer medios óptimos para una reducción substancial de emisiones de SO_2 en calderas teniendo una vida útil limitada.

Las desventajas incluyen la incertidumbre de su factibilidad para una remoción de alta eficiencia de SO_2 y su posible impacto en el funcionamiento de la caldera.

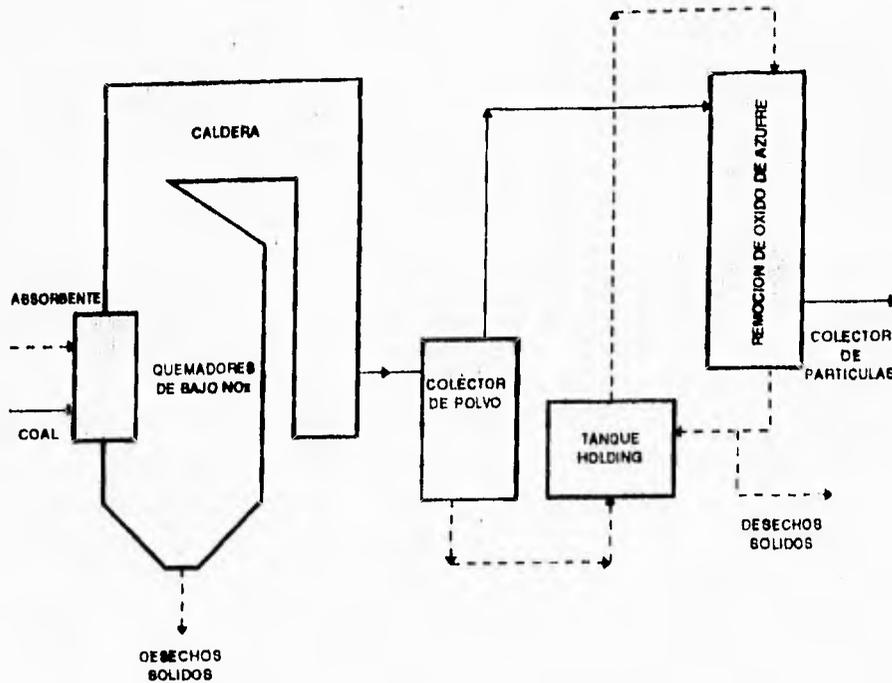


Figura 6.5

Producto de desecho. Para un carbón bituminoso en específico de bajo azufre, el cálculo de la composición de desecho sólido recolectado en el colector de polvo de la corriente de escape, variará en función de la relación de alimentación de piedra caliza a el valor molar del carbón de azufre (vea la tabla 6.1). Debido a su alto contenido de cal, el desperdicio sólido puede ser comercializable para usos industriales específicos.

PRODUCTOS DE DESECHO DE LA OPERACIÓN LIMB.

Constituyente	Composición %	
	Ca/S = 2	Ca/S = 4
Ceniza volátil	61.1	45.4
CaO	21.0	33.6
CaSO ₄	17.3	20.5
CaCl ₂	0.5	0.4
CaF ₂	0.1	0.1

Tabla 6.3.

INYECCIÓN SECA.

La inyección seca es un método FGD particularmente asociado con remociones de solo un 70% de SO₂ para carbón de bajo azufre. El absorbente seco finamente fraccionado como el nacolite (NaHCO₃) o trona (NaHCO₃, Na₂CO₄) se inyecta al calentador de aire o directamente al ducto del gas de escape corriente arriba del equipo recolector de partículas. El absorbedor seco reacciona con SO₂ del flujo de gas en el ducto y en el equipo recolector de partículas.

En una demostración a gran escala en una caldera de 22 Mega-watts de carbón pulverizado equipada con un filtro de tela, se probó la factibilidad técnica para servicio de bajo azufre usando nahcolite. La remoción de SO₂ se obtuvo en un 70% con más del 90% de uso de álcali y no se presentaron impactos adversos en el funcionamiento del filtro de tela debido a la inyección de nahcolite. Sin embargo, en condiciones de baja carga con temperaturas menores a los 135°C en el filtro de tela, las remociones de SO₂ son poco probables a menos que se hagan arreglos para pre-descomponer el bicarbonato, sometiendo la nacolite a una temperatura intermedia 230-260°C.

6.4.-PROCESOS REGENERATIVOS FGD.

Estos procesos FGD regeneran el reactivo alcalino y convierten el SO₂ colectado en un subproducto químico útil. Para minimizar el impacto de los componentes de la trampa de recolección de la corriente sin partículas en la calidad del producto y las operaciones FGD, cloruro de hidrógeno y otros elementos colectables a un muy bajo pH generalmente se eliminan del gas de entrada en un sistema pre-depurador corriente arriba del proceso de absorción del SO₂.

PROCESO WELLMAN-LORD.

Este proceso ofrece la regeneración más alta comprobada tecnológicamente en el mundo.

Proceso de operación.

En el absorbedor (figura 6.6) la corriente de gas de SO₂ reacciona con iones de sulfito en una solución acuosa concentrada de sulfito-bisulfito de sodio. Subsecuentemente, el bisulfito en la solución absorbente utilizada, se regenera a sulfito activo por descomposición térmica, utilizando vapor en un evaporador-cristalizador de doble efecto, desechando un producto gaseoso de SO₂ concentrado. La solución de sulfito de sodio regenerada se manda al absorbedor, mientras el producto de SO₂ se enfría para eliminar el vapor de agua y se comprime para el proceso posterior.

El producto es, ya sea ácido sulfúrico concentrado o azufre elemental para venta. Una pequeña porción del SO_2 recolectado se oxida en forma de sulfato y se convierte en sólidos de sulfato de sodio en un cristalizador, que se comercializan como pasta de sal.

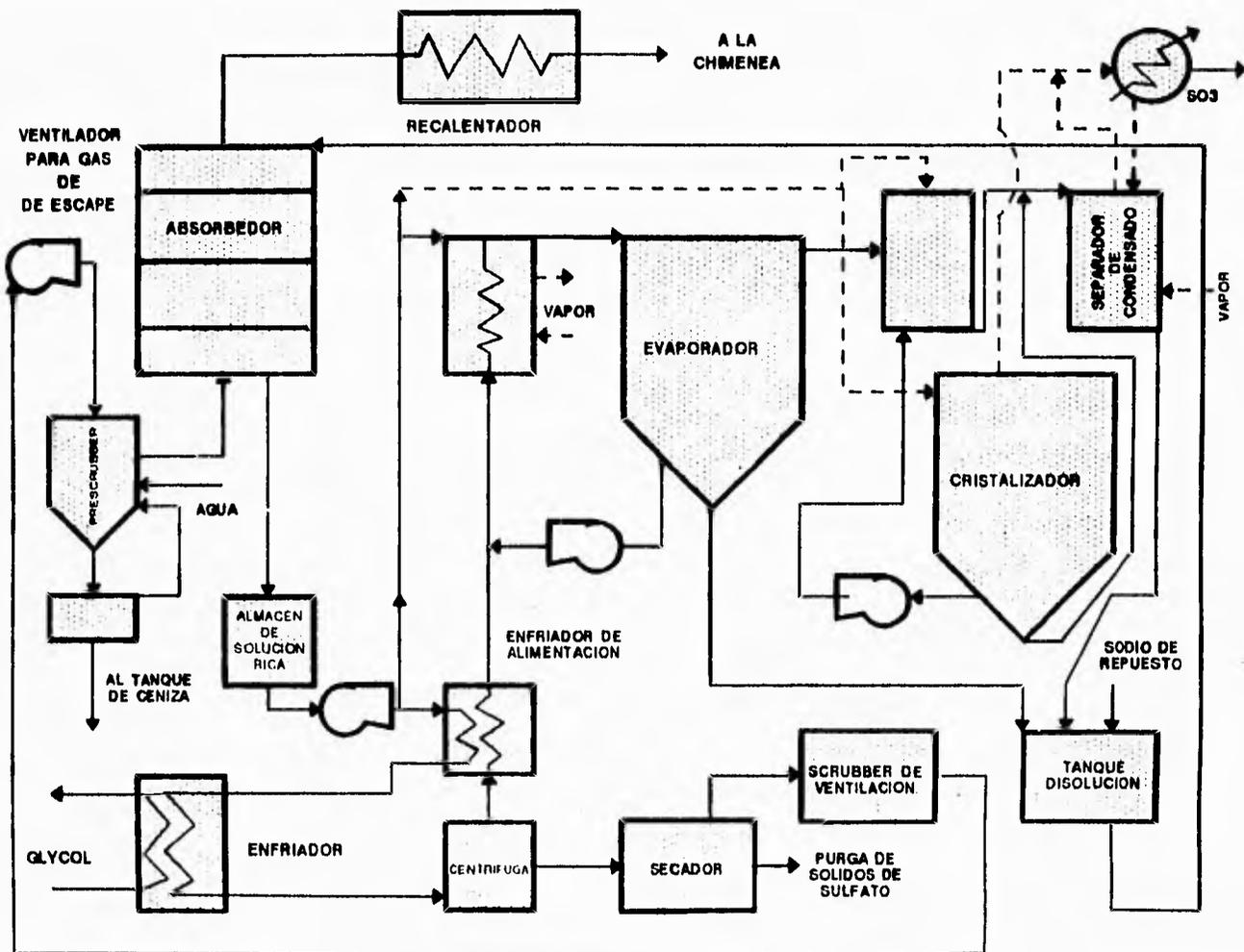


Figura 6.6

Ventajas y desventajas.

El proceso ofrece medios comprobados para lograr las siguientes ventajas:

Mínima producción de desecho sólido y consumo del reactivo alcalino.

Debido a la depuración de sulfito soluble, el proceso es capaz de lograr una alta eliminación de SO_2 sin fraccionamiento químico interno.

Las desventajas de este método pueden ser las siguientes:

Es un proceso complejo con grandes necesidades de área, energía y mantenimiento.

El proceso no contempla regeneración del sulfato que se forma por oxidación accidental, la cual se suma al complejo manejo de desechos.

No es económicamente atractiva en aplicaciones comunes de carbón; en plantas de alto azufre, se han estimado costos de barra de estandarización mayores al 40% por encima de la depuración por piedra caliza sin generación de subproductos.

DEPURACIÓN POR MAGNESIA REGENERATIVA.

Este proceso esta en servicio comercial en algunas industrias de servicio publico de países desarrollados.

Operación del proceso.

Después de un pre-depurado de bajo pH (figura 6.7) el flujo de gas se limpia con una mezcla de sulfito-sulfato de magnesia, la fase líquida de esta, es una solución de sulfito-bisulfito de magnesio, que contiene un alto nivel de sulfato disuelto. Una corriente con partículas suspendidas de la mezcla depuradora se centrifuga para obtener una pasta húmeda que contenga entre el 75 y el 90% de sólidos. Posteriormente la pasta es secada a 204°C en el secador rotatorio de combustible, para obtener una mezcla seca a base de sulfito y sulfato de magnesio.

Esta mezcla se descompone en SO_2 y MgO en un lecho fluidizado a fuego directo o en un horno rotatorio calcinador mantenido a 982°C para lograr la descomposición de una porción importante del sulfato de magnesio. El MgO regenerado, se vuelve a utilizar en el absorbedor después de ser degradado.

El gas producto de SO_2 generalmente se lava y se enfría bruscamente, alimentándose posteriormente a una planta de contacto directo de ácido sulfúrico para producir un subproducto de ácido sulfúrico concentrado.

Ventajas y desventajas.

La capacidad de este proceso para regenerar el sulfato producido por la oxidación tiene grandes ventajas para el manejo de desperdicios.

Otra ventaja podría ser la alta eficiencia de eliminación de SO_2 (99% aprox.).

Un mínimo impacto por las fluctuaciones de los niveles de SO_2 a la entrada a este proceso sobre la eficiencia de depuración.

Baja probabilidad de incrustaciones químicas.

OTROS PROCESOS REGENERATIVOS.

Tres procesos regenerativos adicionales, han sido utilizados en instalaciones a escala comercial.

PROCESOS DE AMONIACO.

Existen diversos procesos de depurado a base de amoniaco. La mayoría de éstos incluyen depuración por amoniaco de un solo paso, en el cuál, la solución cargada de amoniaco hace contacto con el flujo de gas produciendo una solución mezclada de sulfito/sulfato de amonio. Posteriormente se oxida el sulfito de amonio en sulfato, que se recupera de la solución por evaporación del agua (generalmente con calentamiento del flujo de gas antes a la operación de depurado).

La depuración por amoniaco ofrece como ventajas: una alta eficiencia de remoción de SO_2 ; desarrollo de avances químicos simples; y una configuración del proceso relativamente sencilla.

La desventaja principal, es el alto consumo de amoniaco; por lo tanto, es necesario contar con la posibilidad de vender los sub-productos del sulfato de amonio. Además, se debe contar con un buen control en los absorbedores con la finalidad de evitar dispersión de partículas de amonio y poder reducir la purga de éste.

PROCESO POR CARBONATO ACUOSO.

En este proceso se hace un tratamiento a la corriente de gas por medio de un sistema de depuración seca con una base de carbonato de sodio para obtener sólidos ricos en sulfito de sodio.

Este producto se transforma en azufre por medio de una serie de operaciones, incluyendo; una reducción química del sulfato de sodio colada con coque o carbón en un reactor de fundición a una temperatura de 982°C ; enfriamiento de la mezcla en un tanque para formar una solución a 140°C de sulfato de sodio y carbonato, enfriamiento y filtrado de esta solución; por medio de CO_2 y agua, se realiza la carbonización de la solución, obteniendo, H_2S y una solución de carbonato/bicarbonato de sodio. Posteriormente se descompone térmicamente para producir una solución de carbonato de sodio que se puede reutilizar en la depuración del flujo de gas; y finalmente la conversión del H_2S a un subproducto de azufre.

Ventajas y desventajas.

Entre las ventajas se encuentra el uso de una depuración eficiente de base de sodio en lugar de una depuración húmeda y la producción de un subproducto de azufre sin la consiguiente necesidad de los costosos reductores químicos.

Los costos son poco atractivos; se estima que su costo de generación de energía adicional es mayor en un 10% al del proceso Wellman-Lord

PROCESO CÍTRICO.

Después de una pre-limpieza, el flujo de gas sin partículas se depura con una solución de citrato de sodio en una torre paquete. El SO_2 se colecta en una corriente de solución baja en humedad que se transforma en azufre, por medio de operaciones subsecuentes como la realizada en la reacción con H_2S (formado de la parte principal del producto final de azufre) en un sistema de reactivo, agitado por medio de una turbina, produciendo cristales de azufre; posteriormente se realiza una separación de burbujas por flotación de aire; finalmente se recalienta y se decanta la solución para obtener azufre líquido. El sulfato se elimina y se descarga al cristalizarlo por una corriente lateral de solución de citrato que posteriormente se reutiliza.

Ventajas y Desventajas.

Las ventajas incluyen la alta eficiencia de eliminación de SO_2 , una operación libre de incrustaciones en el absorbedor, y la posibilidad de operar con grandes fluctuaciones en los contenidos de SO_2 .

Entre las desventajas se encuentra la alta complejidad del proceso y la necesidad de consumir un gas reductor, así como la producción y el uso del H_2S que es tóxico.

FUTURAS TECNOLOGIAS FGD

Las perspectivas en la tecnología FGD contemplan la selección, el diseño y la operación del sistema.

Selección de los procesos FGD

En los países altamente desarrollados, se estimula a los industriales para construir y diseñar procesos FGD. Ultimamente se ha incrementado la preferencia por los sistemas de depuración con solución de piedra caliza, sin obtención de sub-productos, generalmente con diseños de oxidación forzada.

Al mismo tiempo, se ha incrementado en gran cantidad la aplicación de sistemas de depuración seca con base de cal para aplicaciones de bajo azufre. Una creciente preferencia para la selección de sistemas de depuración por piedra caliza con oxidación forzada se basa en:

- (1) La mayor facilidad y menor costo en el manejo de sus desechos sólidos similares al yeso decantado
- (2) Los beneficios del uso de piedra caliza, menor necesidad de agua, menores probabilidades de incrustaciones internas y la posibilidad de manejar altas concentraciones de cloro en la mezcla de limpieza sin un decremento importante en la depuración del SO_2 .

Diseño de operación.

Las empresas relacionadas con la instalación y diseño de sistemas FGD en países altamente industrializados como Japón, Estados Unidos de Norte América, Alemania, y Canadá entre otros, han acumulado una basta experiencia en las ultimas décadas. Gracias a esto, se cuenta con ciertos criterios en el diseño de procesos y con proveedores de sistemas y equipo auxiliar basados en la semejanza de ambientes FGD. Recientemente, los materiales han recibido mayor atención en sus especificaciones, debido al gran número de fallas que se derivan de estos. Muchos laboratorios y pruebas de campo de aleaciones y recubrimientos han proporcionado a los diseñadores demasiada información para especificar los materiales correctos de construcción de los sistemas FGD.

Además, se ha incrementado la oferta de garantías sobre los materiales por los proveedores de los sistemas FGD. En estos países, las empresas de servicio público también han reforzado su experiencia y los químicos, ingenieros químicos y metalurgistas hoy en día se incluyen en el grupo de trabajo para las operaciones FGD. Muchos laboratorios han iniciado procesos de control y monitoreo químico, logrando optimizar las operaciones, así como disminuir los costos de las operaciones y mantenimiento.

Nuevos procesos en desarrollo.

Los resultados del avance en el desarrollo técnico a corto plazo, no se han visto reflejados en la creación de nuevos procesos comerciales FGD, más bien, han logrado refinar el diseño de los FGD basados en piedra caliza.

A largo plazo se ha incrementado el énfasis de ambientes de control integrados, dónde los sistemas FGD y otras funciones de control de contaminantes se diseñan en nuevas plantas de potencia, de tal manera que su economía global y efectividad se maximizan. Al mismo tiempo un mayor rango de nuevos descubrimientos tecnológicos, se han enfocado a procesos que pueden muy probablemente integrar el control futuro de partículas NO_x y SO₂.

Lo que se pretende lograr con los conceptos combinados de remoción de SO₂/NO_x es lograr un ahorro de por lo menos 20-25% comparado con una reducción catalítica selectiva en serie y depuración por caliza. Los procesos con un creciente interés incluyen; lecho fluidizado de oxido de cobre, lecho circulante de oxido de cobre, el proceso de depuración por aluminio y sodio Lurie, irradiación de un haz de electrones, el proceso NO_xSO, radiación por descarga térmica, el proceso Sulf-X y el secado por atomización de óxido de zinc

7.-TECNOLOGIAS Y EQUIPO PARA EL TRATAMIENTO DE PARTICULAS.

7.1.- DESARROLLO DE TECNOLOGIAS PARA EL TRATAMIENTO DE PARTICULAS.

En lo que respecta a la contaminación atmosférica, en México la cantidad de energía consumida se incrementó rápidamente ante el crecimiento económico experimentado en los años 60's. Para finales de los años 60's, la contaminación debida a partículas suspendidas en el aire y ácido sulfúrico se consideró un problema grave para la sociedad.

A principios de los setenta se asentaron las primeras zonas industriales en Azcapotzalco, se inició la localización industrial en el municipio de Ecatepec y hubo una notable expansión física de la ZMCM, principalmente con la creación de ciudad Nezahualcóyotl.

Debido a eso el gobierno mexicano promulgó en 1971 el Reglamento para la prevención y control de la contaminación atmosférica originada por la emisión de humos y polvos.

El procedimiento para reducir la influencia y concentración de las partículas suspendidas totales en el aire (PST), fue implementar colectores de partículas en las Industrias y en las plantas generadoras de energía eléctrica, cambiar sus colectores de partículas por otros más eficientes para la difusión y disminución de la concentración de los humos.

En esos días, las centrales eléctricas usaban colectores mecánicos (multi-ciclones) o precipitadores electrostáticos, pero se requería equipo mucho más eficiente y por lo tanto, se introdujeron precipitadores electrostáticos de alta eficiencia, además se realizó el cambio en el uso de combustible del carbón a petróleo.

La crisis del petróleo ocurrida en 1973 después de la diversificación de los combustibles, había sido precedida por la correspondiente situación energética y fue en este momento cuando se pensó en regresar al uso del carbón.

El carbón es un ejemplo representativo de la diversificación de los combustibles, pero el hollín generado por este es uno de los problemas graves de este tipo de combustible.

Por ejemplo, el polvo de carbón (cenizas suspendidas o volátiles) es producida en cantidades mayores a 100 veces comparado con el aceite combustible (combustóleo), y las cenizas generadas son de una aparente resistencia eléctrica mayor, esto debido al menor contenido de azufre en el carbón.

Así, problemas como ese preocupaban a las tecnologías de los precipitadores electrostáticos, pero para desarrollar tecnologías totales para el tratamiento de gases de escape no solo se debe pensar en partículas, debemos incluir tecnologías De-NO_x y De-SO_x.

La contaminación por partículas es la forma más visible de contaminación atmosférica. Las que se encuentran más comúnmente contaminando la atmósfera tienen diámetros que van de 0.001 μm a 10 μm , formando el llamado aerosol atmosférico (dispersión de partículas en aire).

En general, las partículas arrastradas por el aire varían su tamaño desde 0.001 a 500 μm .

Dichas partículas se originan por procesos industriales, por la combustión de combustibles fósiles, etc. También existe la contaminación por partículas en forma natural, como las producidas en las erupciones volcánicas, las tormentas de arena en los desiertos, las tolvaneras en lugares erosionados, etc.

Una partícula puede ser heterogénea en su estructura habiéndose formado a partir de una pequeña "semilla" o núcleo de Aitken, por quimisorción y adsorción física.

Las partículas menores de 1 μm de diámetro se originan en la atmósfera principalmente a través de procesos de combustión y condensación. Las mayores de 10 μm de diámetro resultan de procesos mecánicos tales como erosión por el viento, molido de materiales, pulverizado de materiales, etc. Los productos de combustión y los aerosoles fotoquímicos constituyen una gran parte de las partículas en la escala de 0.1 μm a 1 μm de diámetro.

Las partículas menores de 0.1 μm (originadas por combustión) se caracterizan por movimientos al azar producidos por colisiones con moléculas gaseosas. Son altamente concentradas, se mueven rápidamente y colisionan frecuentemente. Crecen de tamaño rápidamente, por nucleación, adsorción y absorción con moléculas gaseosas y adhesión con otras partículas. Las partículas mayores de 1 μm tienen velocidades de sedimentación importantes y sus movimientos se desvían significativamente del movimiento del aire.

Las partículas generadas por combustión se forman por diferentes causas:

- 1- El calor puede vaporizar materiales que se condensan posteriormente, produciendo partículas entre 0.1 y 1 μm .
- 2- Las reacciones químicas del proceso de la combustión pueden producir partículas de cúmulos moleculares inestables de corta duración por debajo de aprox. 0.1 μm .
- 3- Los procesos mecánicos pueden liberar cenizas o partículas de combustible de 1 μm o mayores.
- 4- Si intervienen aspersiones de combustibles líquidos, puede que se escape directamente una ceniza muy fina.
- 5- La combustión parcial de los combustibles fósiles puede producir hollín.

GENERACION Y CONTROL DE HOLLIN Y POLVOS.

Hace 10 años, los equipos de combustión tales como calderas, eran operados en condiciones de 20% de exceso de aire (Concentraciones de oxígeno en los gases de escape de una caldera de 4%).

Recientemente se utilizan excesos de aire del 10% en la combustión (obteniendo concentraciones de oxígeno en los gases de escape cerca del 2%), esto ha sido debido al progreso de las técnicas de combustión para la economía y el control de los NO_x .

En estas condiciones, las concentraciones de polvos en una caldera usando aceite pesado varían de 0.1 a 0.4 g/ Nm^3 , y en una caldera que usa carbón obtenemos de 10 a 20 g/ Nm^3 (cerca de 100 veces más de una caldera de aceite pesado). La cantidad de hollín y polvo obtenido depende de los métodos de combustión y de los contenidos de cenizas y carbono residual del combustible.

CENIZAS SUSPENDIDAS EN EL AIRE.

Las cenizas suspendidas en el aire contienen en su mayoría ceniza y una minoría de combustible inquemado. El aceite pesado contiene poca ceniza (menos de 0.15%), pero el carbón contiene de 10 a 20 %.

En caso de combustión de carbón, los materiales volátiles y los contenidos de fácil descomposición son primeramente quemados. Posteriormente se queman las superficies del carbón residual (llamadas CHAR o partículas carbonizadas). En este caso, un poco de combustible inquemado y partículas inquemables son retirados por los gases de escape.

Los componentes principales de las cenizas son: SiO_2 (óxido de silicio), Al_2O_3 (óxido de aluminio), Fe_2O_3 (óxido férrico), CaO (óxido de calcio), TiO_2 (óxido de titanio) y MgO (óxido de magnesio), los cuales son óxidos metálicos. Y pocos metales; los cuales están compuestos de Na (sodio), V (vanadio), Pb (plomo), Se (selenio), As (arsénico), Ga (galio), Zn (zinc), Mo (molibdeno) y S (azufre incombustible); el cual se evapora en la zona de alta temperatura, se condensa en las zonas de baja temperatura y se combina con las finas partículas de ceniza. Si el tiempo de estadía en la zona de alta temperatura es corta, una mayor cantidad de combustibles inquemados son generados.

CENOSFERAS.

Si el carbono residual del aceite pesado (5 - 15% del contenido) o el compuesto de carbono del carbón (45 - 55% del contenido) no es quemado completamente en la cámara de combustión, se genera combustible inquemado en forma de partículas de carbono. A estas partículas se les nombra "CENOSFERAS".

En el caso de usar aceite pesado, se debe atomizar el aceite en forma de finas partículas, que al ser calentadas, descargan o liberan sus constituyentes volátiles, los cuales son quemados en un estado de gas. Una vez realizada esta operación, los constituyentes residuales se carbonizan. Este carbono residual es sólido, poroso y de una forma irregular.

Estas cenosferas pueden ser quemadas en la cámara de combustión, pero algunas de ellas no se queman debido a que la velocidad de combustión es lenta y el tiempo de estadía en la zona de alta temperatura no es suficiente.

El diámetro de las "CENOSFERAS" es aprox. = 10 - 300 μm .

En el caso de usar carbón, algunos compuestos de carbono tienden a no quemarse y permanecer como cenizas. La cantidad de combustible inquemado depende de los materiales volátiles del combustible, debido a que la velocidad de combustión está influenciada directamente con ellos.

HOLLIN GENERADO EN CONDICION DE GAS.

Cuando un combustible gaseoso o los constituyentes volátiles de los combustibles líquidos o sólidos se descomponen en la zona de alta temperatura ante una escasez de oxígeno, se generan hidrocarburos no saturados de un bajo peso molecular, los cuales se combinan formando macromoléculas. Estas se colapsan entre sí y aumenta su tamaño, con esto se genera el llamado hollín (0.02 - 0.03 μm). Estas macromoléculas pueden permanecer individualmente, pero a menudo se encuentran formando estructuras de cadenas.

El hollín generado en la flama puede ser quemado rápidamente en presencia de suficiente oxígeno y una alta temperatura, aunque alguna parte de este hollín puede permanecer sin quemarse.

CONTROL DE HOLLIN Y POLVOS POR TECNICAS DE COMBUSTION.

USAR COMBUSTIBLE DE BUENA CALIDAD.

Cuando usamos aceite pesado, podemos seleccionar al que contenga bajo contenido en carbono residual. En caso de usar carbón se debe seleccionar aquel que tenga una baja relación de combustible. La relación de combustible es la razón de compuestos de carbono contra los materiales volátiles, y por supuesto, el carbón con poca ceniza es mejor para ser usado.

Como se sabe, si el factor de hollín y polvos es reducido, la generación de estos es controlada.

IMPLEMENTACION DE ATOMIZACION Y PULVERIZACION

Si las partículas de combustible son más pequeñas, el área total de contacto de estas será más grande. Así se consigue una mezcla de combustible y oxígeno mejor. Más aun el carbono residual se quema mejor.

ejemplos:

En el caso de aceite pesado podemos incrementar la cantidad de vapor para el atomizado.

En el caso de usar carbón podemos incrementar la eficiencia de pulverización.

OPERACION CON UN APROPIADO EXCESO DE AIRE

La operación a bajos excesos de aire generalmente causa una combustión pésima, debido a la cantidad de combustible inquemado liberado a la atmósfera, además del incremento del hollín y polvo.

Un bajo exceso de aire cuando el aire de combustión no es repartido equitativamente en la cámara de combustión, causa zonas de escasez de oxígeno. Para prevenir estas zonas, el aire de combustión debe ser repartido equitativamente en esta.

Por otro parte, la operación con altos excesos de aire , causa una baja temperatura de combustión y un corto tiempo de estadía en la zona de alta temperatura. Como resultado de esto se tiene un incremento en la generación de hollín y polvos.

Cuando se arranca un generador de calor (caldera), debemos tener cuidado particularmente en el control del aire de combustión. Bajo exceso de aire o una combustión en dos etapas son buenos métodos para el control de NO_x , pero es importante hacer un balance entre la generación de NO_x y hollín.

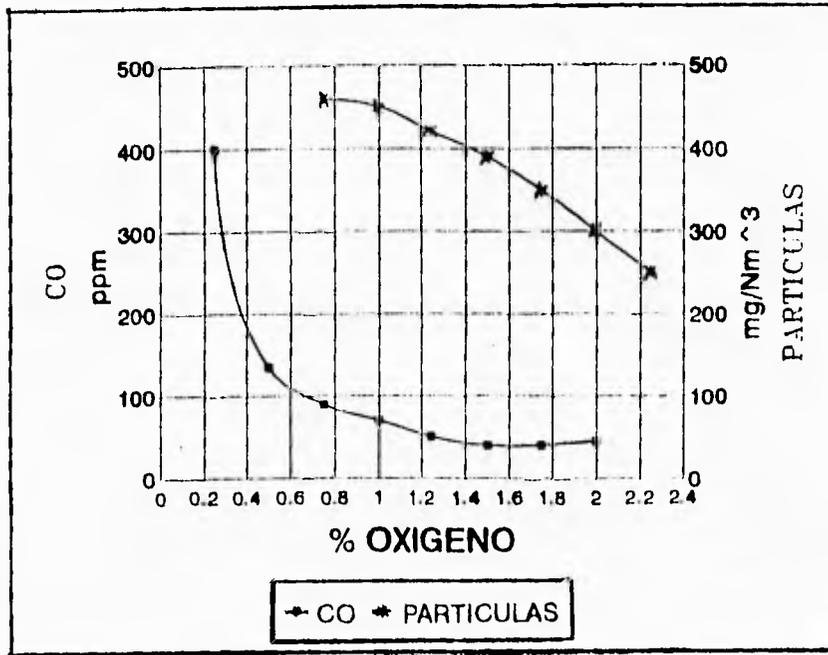
DATOS DE REFERENCIA

RELACIONES MUTUAS ENTRE CONCENTRACION DE OXIGENO, MONOXIDO DE CARBONO Y HOLLIN

Ejemplo de una caldera convencional de una planta de generación de energía eléctrica, la cual utiliza aceite pesado como combustible.

La concentración de monóxido de carbono es un índice de una combustión incompleta. De acuerdo a los datos , bajo exceso de aire de combustión causa un gran contenido de monóxido de carbono en los gases de escape, especialmente cuando la concentración de oxígeno es menor al 1%.

La concentración de polvos es un indicador de la cantidad de carbono inquemado. En la práctica, mientras la concentración de oxígeno es alta, la producción de polvos es baja.



Gráfica 7.1 Oxígeno Vs. Monóxido de Carbono Vs. Partículas.

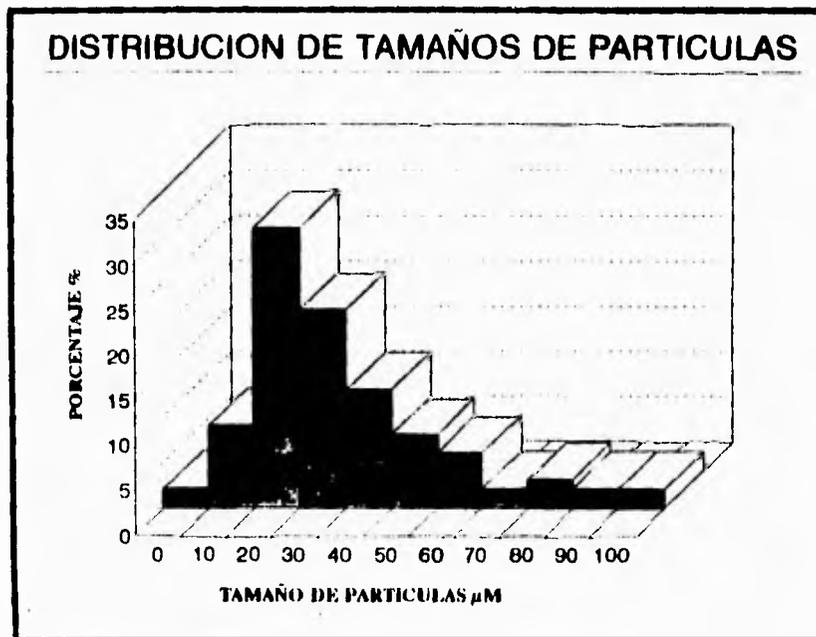
DISTRIBUCION DE LOS TAMAÑOS DE PARTICULAS

Ejemplo de una caldera convencional de una planta de generación de energía eléctrica, la cual utiliza aceite pesado como combustible.

De acuerdo a los datos, el tamaño de la mayoría de las partículas varía entre 15 - 45 μm .

Juzgando por el tamaño, estos polvos contienen demasiadas "CENOSFERAS" (carbón inquemado). Las partículas menores a 10 μm son muy pocas, en este caso con un simple colector de partículas de proceso húmedo (scrubber) podríamos obtener altas eficiencias de recolección.

Gráfica 7.2



7.2.- TEORIA DE COLECTORES DE PARTICULAS.

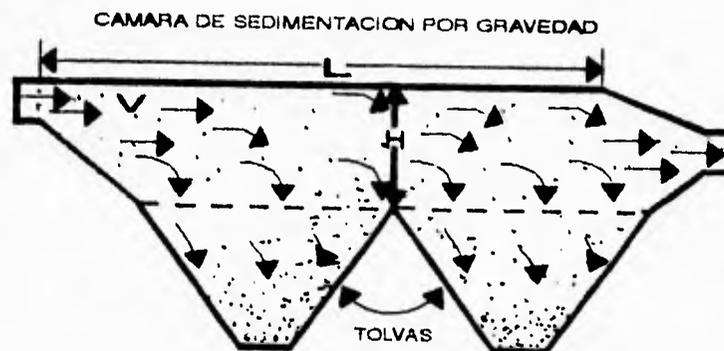
Los colectores de partículas están clasificados de acuerdo al mecanismo de recolección empleado:

- × Colectores de partículas por gravedad.
- × Colectores de partículas centrífugos.
- × Colectores de partículas de proceso húmedo.
- × Filtros bolsa.
- × Precipitadores electrostáticos.

COLECTORES DE PARTICULAS POR GRAVEDAD

Se puede emplear la fuerza gravitacional para remover las partículas en cámaras de sedimentación cuando la velocidad de sedimentación sea mayor de 13 cm/s. En general, esto se aplica a partículas cuyo tamaño sea mayor a 50 μm si la partícula tienen una baja densidad, y tan bajas como 10 μm si el material es razonablemente denso. Partículas todavía más pequeñas requerirían excesivas distancias de flujo, lo que llevaría a volúmenes excesivos de las cámaras. En la figura siguiente se muestra una configuración usual de una cámara de sedimentación.

Figura 7.1 Cámara de sedimentación por gravedad.



Para que una cámara impida el arrastre de partículas sedimentadas, la velocidad del gas deberá ser uniforme y relativamente baja (de preferencia menor a 30 cm/s).

Teóricamente, el tamaño mínimo de la partícula que se puede captar con un 100% de eficiencia, se puede determinar de la forma siguiente.

Haciendo referencia a la misma figura, el tiempo requerido para que una partícula de tamaño d_p caiga una distancia H , y escape en consecuencia de la corriente de gas, deberá ser igual o menor que el tiempo requerido para moverse horizontalmente una distancia L . Para el tamaño mínimo de la partícula que se pueda remover con un 100% de eficiencia, estos dos tiempos serán iguales. Por tanto, para el flujo uniforme del ducto será.

$$t = H / V_t = L / V$$

donde se supone que todas las partículas pasan por la cámara de sedimentación a la velocidad del gas (V).

COLECTORES DE PARTICULAS CENTRIFUGOS.

Este tipo de equipo hace a los gases de escape girar. Este giro le da a las partículas que se encuentran mezcladas con el gas, una fuerza centrífuga y de esta forma son separados los polvos del gas.

Primeramente el flujo de gases fluye dentro de un tubo exterior y es forzado a girar. Debido a esta fuerza centrífuga las partículas pesadas del polvo se colapsan en el tubo exterior y se deslizan por la superficie de este hasta llegar a la parte más baja donde son recolectadas.

Una vez finalizada esta operación, el flujo de gas fluye girando dentro del tubo interior y las partículas (sólidas o líquidas) arrastradas por el gas son forzadas a entrar a esta parte del equipo. Por otra parte, las partículas que son forzadas a entrar debido a la fuerza centrífuga, son sometidas a un balance de fuerzas dependiendo del tamaño de las mismas.

La fuerza ejercida a la partícula en dirección ascendente esta en proporción al tamaño de la partícula.

La fuerza ejercida a la partícula en dirección descendente esta en proporción del peso de esta. (aproximadamente al cubo al tamaño de la partícula).

Como se sabe, solo hay un tamaño de partícula que guarda un balance de fuerzas (ascendentes y descendentes). En este caso, la partícula que se encuentra en un flujo turbulento puede o no ser recolectada y en general solo la mitad de estas partículas con características bien definidas (tamaño y peso) son recolectadas.

Por lo general, el separador ciclónico (centrífugo) se utiliza para eliminar partículas con tamaños de 10 μm o mayor. No obstante, los separadores centrífugos convencionales rara vez remueven partículas con una eficiencia mayor del 90 %, a menos que la partícula tenga un diámetro de 25 μm o mayor.

Tabla 7.1. Eficiencia de recolección de los ciclones Vs. Tamaño de partícula.

Tamaño de la partícula (μm)	Ciclones convencionales	Ciclones de alta eficiencia
< 5	< 50	50 - 80
5 - 20	50 - 80	80 - 95
15 - 50	80 - 95	95 - 99
> 40	95 - 99	95 - 99

COLECTOR CENTRIFUGO CON ENTRADA DE GAS TANGENCIAL.

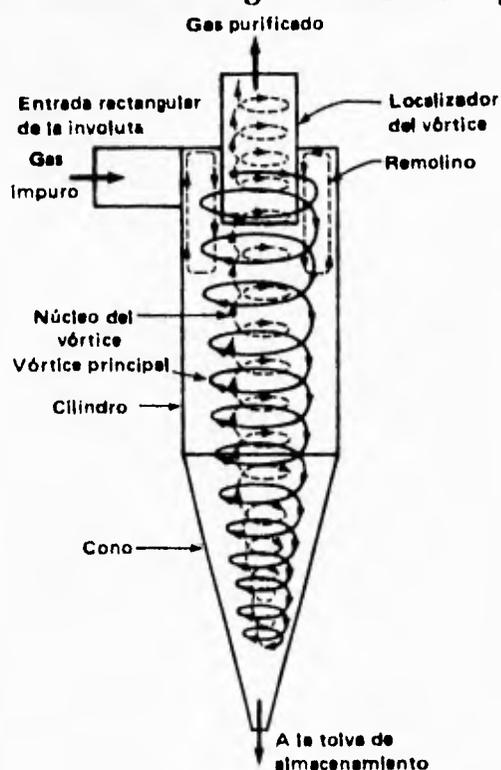
Este tipo de equipos se muestra en la figura 7.2. El gas de escape entra tangencialmente dentro del tubo exterior del ciclón y el gas limpio asciende dentro del tubo interior del equipo.

La velocidad del gas a la entrada, por lo general varía de 7 - 15 m/s. Dentro de este rango de velocidades, la eficiencia de recolección depende del diámetro del tubo interior. Debido a que la fuerza centrífuga es inversamente proporcional al diámetro de este.

La caída de presión dentro de estos equipos a una velocidad de 12 m/s es aproximadamente de 100 mmca.

En la práctica, el diámetro del tubo interior es definido por el tamaño de las partículas a remover. Por lo tanto, un colector centrífugo está diseñado para trabajar dentro de un rango de flujo de gas. Si usamos un flujo de gas muy grande, podemos utilizar dos o más equipos al mismo tiempo, pero siempre es difícil distribuir cantidades de flujo iguales a todos los colectores centrífugos.

Figura 7.2 Colector centrífugo con entrada de gas tangencial.



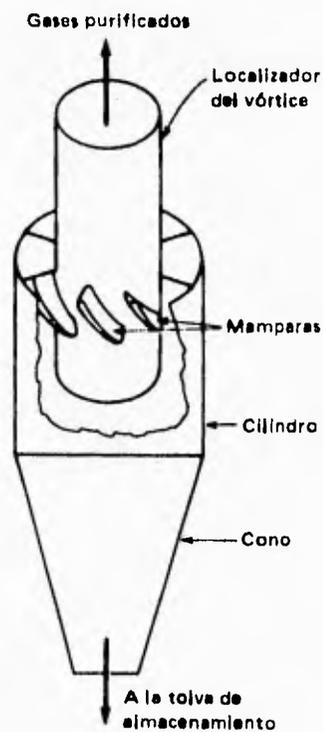
COLECTORES CENTRIFUGOS DE FLUJO AXIAL.

Este tipo de equipos se muestra en la figura 7.3. El gas de escape fluye axialmente dentro del tubo exterior. Una vez dentro, el gas es forzado a girar debido a las aletas guías por las cuales pasa. El gas limpio asciende dentro del tubo interior para después salir del equipo. A velocidades de 12 m/s la pérdida de presión en el ciclón es de aproximadamente 80 mmca (menor que el colector ciclónico tangencial).

En este tipo de equipos, el flujo axial puede ser fácilmente distribuido equitativamente a todos los colectores centrifugos.

Para el caso de un multi-ciclón, los delgados tubos interiores pueden ser usados para recolectar las más finas partículas de los gases de escape. El diámetro mínimo de los tubos interiores varían de 100 - 150 mm para evitar el bloqueo de estos debido a las partículas colectadas.

Figura 7.3 Colectores centrifugos de flujo axial.



Separador centrífugo de mamparas axiales (ciclónico)



COLECTORES DE PARTICULAS DE PROCESO HUMEDO (SCRUBBER).

Cuando atomizamos agua de lavado dentro de los gases de escape, se generan finas gotas de agua las cuales se combinan con las pequeñas partículas de polvo y de esta forma se colecta la mayoría de las partículas dentro del gas de escape. Este proceso se realiza debido a fuerzas de inercia y de difusión.

Los Scrubbers no se deben utilizar para grandes concentraciones de polvo, a menos que se instalen equipos adicionales que ayuden al buen funcionamiento de estos.

Por ejemplo.- Si utilizamos un scrubber para una caldera que utilice carbón como combustible, se generaría una mezcla densa de cenizas y agua, con la cual se dañarían las bombas, tuberías y boquillas de los atomizadores.

FUERZAS DE INERCIA

En el caso de los scrubbers, las gotas de agua atomizadas hacen contacto con el polvo y de esta forma el polvo es retirado de los gases de escape. Cuando este tipo de equipo es utilizado para partículas mayores a $1\ \mu\text{m}$, la fuerza colectora principal es la fuerza de colisión inercial.

Para obtener una fuerza mayor (inercial), algunas condiciones de este proceso son requeridas. Como se sabe, las partículas del polvo deberán de ser grandes o pesadas para conseguir una mayor velocidad relativa entre el polvo y las gotas de agua, una más baja viscosidad de gas, y se debe obtener el tamaño de gotas de agua menor para maximizar el contacto entre el agua y las partículas.

FUERZAS DE DIFUSION

Cuando el tamaño de las partículas en el gas es muy pequeño, estas se mueven con más aproximación al movimiento Brownian. En este caso, el polvo contenido en el gas es más fácilmente impactado por las gotas de agua. Cuando las partículas son menores a $0.1\ \mu\text{m}$, la fuerza más importante es la fuerza de difusión, y para eficientar este proceso se requiere de que la viscosidad del gas sea lo más baja posible, también se requiere un menor tamaño de gotas de agua. Para partículas más pequeñas contenidas en el gas, requieren una menor velocidad relativa entre el polvo y las gotas de agua. (lo opuesto a las fuerzas de inercia)

NO GENERACION DE SUBPRODUCTOS EN LA DESULFURIZACION.

En el caso de procesos de desulfurización tales como el de Hidróxido de Magnesio, no tenemos generación de subproductos en la desulfurización. Por esta razón, no es un problema la mezcla de agua de lavado con la solución absorbedora de la desulfurización. En este caso, el scrubber por lo general es construido (instalado) en el ducto de entrada del equipo de desulfurización.

Cuando no tenemos generación de subproductos, se pueden utilizar dos tipos de scrubbers:

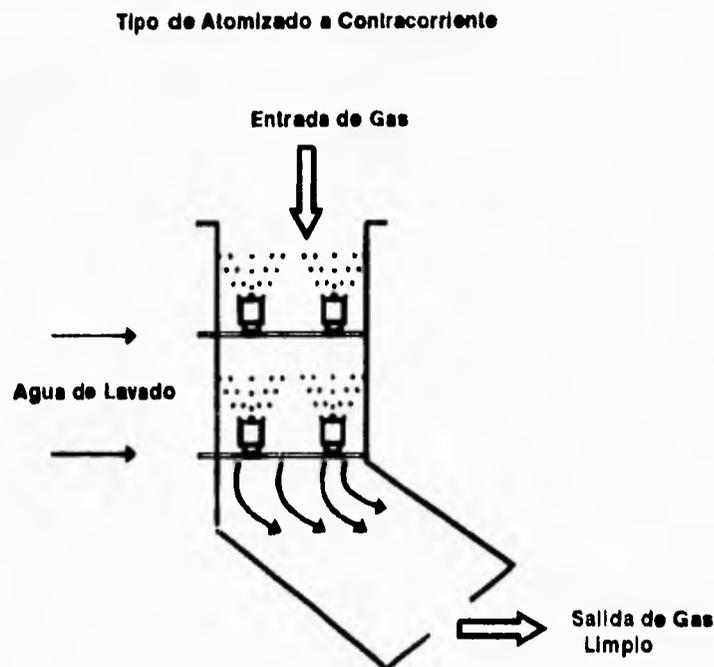
ATOMIZACION A CONTRACORRIENTE

Si las partículas contenidas en el gas son en su mayoría mayores de $20 \mu\text{m}$, el tipo de scrubber empleado es con atomización a contracorriente, este tipo de equipo se ilustra a continuación. en la figura 7.4.

Este tipo de equipos trabajan con una alta eficiencia de recolección de partículas (entre 85-95 % a esa distribución de tamaño) debido a la alta velocidad relativa obtenida entre el polvo y las gotas de agua.

La relación de líquido - gas es $1.5 - 2.5 \text{ l/Nm}^3$. La velocidad del gas varía entre $13 - 15 \text{ m/s}$. La caída presión en este tipo de equipos es de $30 - 50 \text{ mmca}$.

Figura 7.4



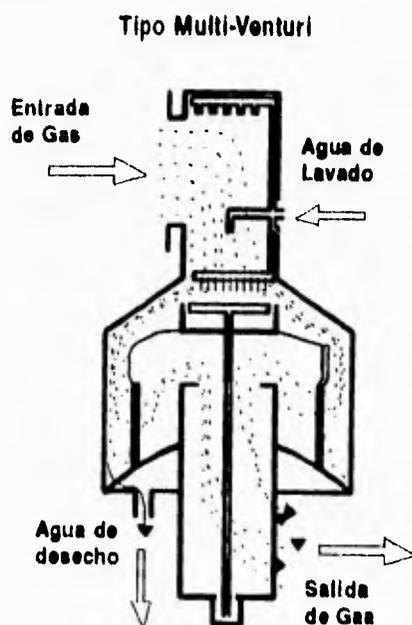
TIPO MULTI-VENTURI

Si las partículas contenidas en el gas son en su mayoría pequeñas ($1 - 5 \mu\text{m}$), el tipo de scrubber empleado es un multi-venturi, este tipo de equipo se ilustra a continuación en la figura 7.5.

La relación líquido - gas es $2.0 - 2.5 \text{ l/Nm}^3$. La velocidad del gas en la zona de máxima velocidad es $40 - 50 \text{ m/s}$.

La caída de presión es bastante en este tipo de equipos (entre $200 - 250 \text{ mmca}$) pero se obtiene una alta eficiencia en la recolección de partículas finas.($90-95\%$)

Figura 7.5



GENERACION DE SUBPRODUCTOS EN LA DESULFURIZACION.

En el caso de procesos de desulfurización tales como el de desulfurización húmeda por piedra de caliza, tenemos generación de subproductos en la desulfurización. Por esta razón, para prevenir la mezcla del polvo con el subproducto, el gas debe de ser desulfurizado antes de pasarlo al equipo de eliminación de partículas.

El equipo mostrado en la figura 7.6, es un scrubber tipo venturi, y es el que generalmente se utiliza para el proceso de desulfurización antes mencionado.

El gas a tratar pasa a través de la garganta del venturi, que es la parte con menor diámetro del equipo. En esta parte (garganta) es donde se atomiza el agua de lavado.

La velocidad del gas en la garganta es muy elevada (generalmente diseñada a ser de 60 - 90 m/s) y debido a eso, las gotas de agua deben de ser muy pequeñas. Cuando el gas pasa a través del difusor, la velocidad del gas empieza a decrementarse, debido a esto, la velocidad relativa entre el polvo y las gotas de agua se incrementa y la colisión inercial llega a ser más intensa.

La relación líquido - gas es de 0.5 - 1.5 l/Nm³. La caída de presión es generalmente de 300 - 800 mmca. Este tipo de scrubber tiene altas eficiencias de funcionamiento en el caso de partículas muy finas. La eficiencia parcial de recolección en partículas de 0.3 mm, es cerca del 90%.

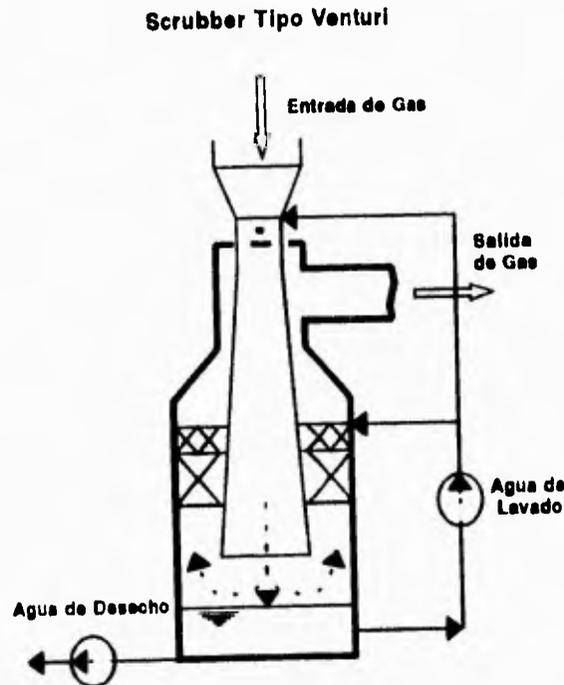
Cuando el gas sale del venturi, por la parte inferior cerca del nivel de agua, la mayoría de las partículas se recolectan por que se colapsan con el agua. El polvo restante fluye junto con el gas verticalmente donde una gran parte del polvo restante se recolecta en el llamado filtro de cama o capa húmedo.

El polvo separado del gas por el scrubber se mezcla con el agua.

Antes de que el agua sea descargada en el canal de desecho, el polvo debe ser retirado de esta.

El equipo que separa el polvo del agua se llama deshidratador (Se utiliza normalmente un filtro prensa), y el polvo es generalmente descargado en forma de pasta deshidratada.

Figura 7.6



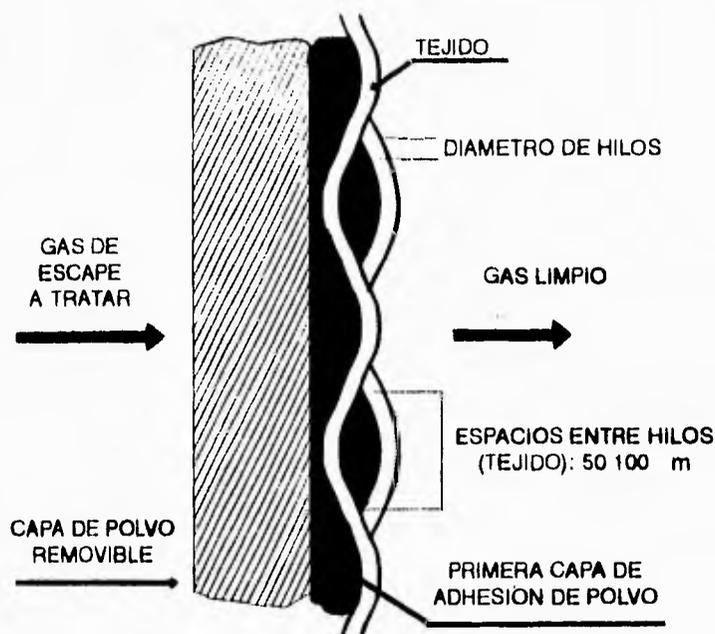
FILTROS BOLSA.

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

En general se utilizan filtros hechos de tela para retener las partículas. Este equipo consta de muchos filtros de tela cilíndricos, los cuales colectan el polvo en la superficie de la tela.

Cuando los gases de escape fluyen a través del tejido de la tela, algunas partículas se adhieren directamente a la superficie de los hilos de la bolsa y otras son recolectadas entre los espacios que hay entre los hilos. En este caso, toda la superficie de la tela es cubierta con polvo (se genera la primera capa de adhesión de polvo), esta capa de polvo es sumamente delgada y tiene pequeños orificios por donde fluye el gas y con esto se puede captar partículas más pequeñas.

Figura 7.7 Filtros bolsa.



EFICIENCIA DE RECOLECCION Y PERDIDA DE PRESION.

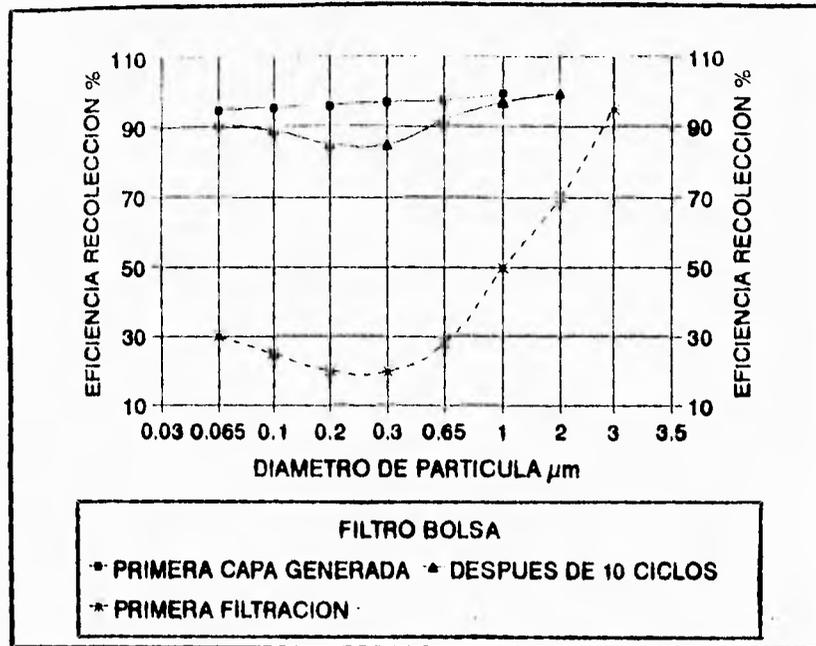
La capa de polvo adherida en los filtros de tela crece con el tiempo. Y como la capa de polvo crece, la caída de presión aumenta. Por otra parte, la eficiencia de recolección en la primera capa de polvo es muy baja, especialmente cuando se tienen partículas menores a $1 \mu\text{m}$ (aproximadamente del 50%). Una vez formada la primera capa de adhesión de polvo, la eficiencia de recolección se mantiene alta. (95% en partículas de $0.1 \mu\text{m}$ y 99.5% en partículas de $1 \mu\text{m}$).

La caída de presión en este tipo de equipos es controlada por debajo de los 150 - 200 mmca. Cuando esta caída de presión se incrementa, la capa de polvo debe de ser removida. Hay una diferente adhesión entre el polvo - tela y el polvo adherido a la primera capa de polvo.

El polvo adherido a la primera capa de polvo es fácilmente removido, pero una cierta cantidad de polvo se adhiere fuertemente el cual no se remueve fácilmente. Se sabe, que después de algunos ciclos (filtración - remoción), la eficiencia de recolección se mantiene alta.

El gas que penetra al filtro bolsa lo hace en un flujo laminar y la caída de presión está en proporción a la velocidad de penetración y esta a su vez al espesor de la capa de polvo.

Gráfica 7.4 Diámetro de partícula Vs. Eficiencia.



CARACTERISTICAS DE LOS FILTROS BOLSA.

Los filtros bolsa se clasifican en dos tipos:

- Filtro de tela tejida hecha de fibra sintética o fibra de vidrio.
- Filtro de fieltro hecho de fibra sintética.

La forma de los filtros de tela es generalmente cilíndrica.

Cuando la temperatura de los gases de escape es menor a 150 °C, los filtros empleados son de fibras sintéticas. Cuando la temperatura varía entre 150 - 250 °C, se usan filtros hechos de fibra de vidrio.

En el caso de captación de partículas con una alta resistencia eléctrica, se debe agregar acero inoxidable a las fibras o deben de ser tratadas con grafito para conectar la carga del polvo a tierra y con esto facilitar la remoción del polvo.

REMOCION DE PARTICULAS.

Existen dos diferentes formas de remoción de polvo:

- remoción intermitente.
- remoción continua.

En el caso de remoción intermitente, las cámaras de recolección están divididas en 3 o 4 partes por medio laminas, las cuales están perfectamente aisladas por compuertas y es donde se lleva a cabo la remoción del polvo. Cuando la remoción de partículas es de este tipo, el polvo no se escapa fuera del equipo, por lo que la eficiencia de recolección es elevada.

En el tipo de remoción de polvo continua, se realiza esta operación ordenadamente y a una caída de presión constante. Generalmente se usa cuando tenemos altas concentraciones de partículas o cuando el polvo se adhiere entre si fácilmente a bajas temperaturas o en un tiempo corto.

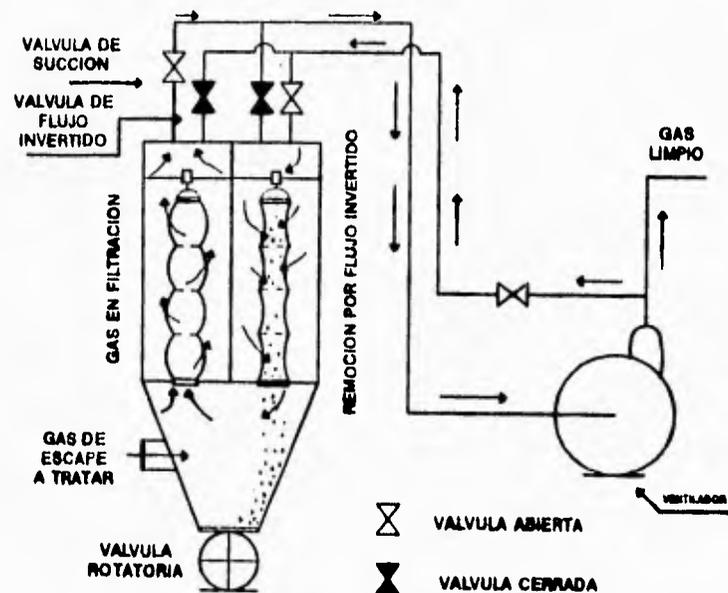
Existen varios métodos de remoción de polvo, pero los más importantes son los tres descritos brevemente a continuación.

1).- Remoción por flujo invertido.

La captación de polvo en los filtros bolsa, se realiza de la forma descrita anteriormente. Para llevar a cabo la limpieza de los filtros se realiza el siguiente procedimiento:

El flujo de gas ya filtrado se hace pasar desde dentro de los filtros hacia afuera. Cuando el polvo es removido, el compresor de aire es alimentado de adentro hacia afuera. Este método es mayormente usado para la remoción de polvo intermitente. En lugar de elevar la eficiencia de remoción, la repetición de este flujo invertido y el empezar nuevamente el proceso de filtración, hacen que este método sea inusual. En este caso, generalmente el flujo invertido se alimenta por algunos segundos y esta operación se repite muchas veces.

Figura 7.8 Remoción de flujo invertido



2).- Remoción por chorro de aire.

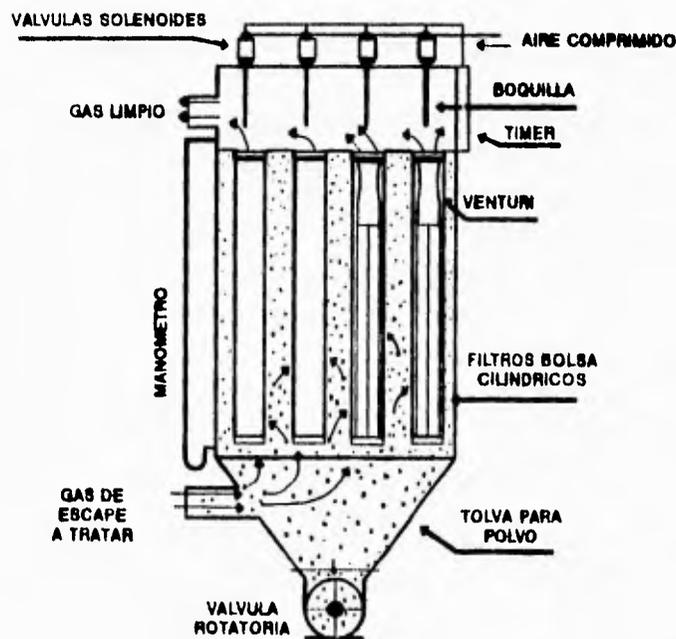
El gas fluye de afuera hacia dentro de los filtros bolsa, por lo tanto el gas limpio fluye por dentro de los filtros de tela. Este tipo de equipos tienen boquillas por las cuales se inyecta un chorro de aire a una alta presión y se sitúan por arriba de los filtros de tela.

Los filtros a su salida tienen tubos venturi.

Por períodos de tiempo establecidos, la tobera introduce el chorro de aire hacia los tubos venturi incrementando la presión dentro de los filtros. Por esta razón, el polvo adherido en la parte externa al filtro es removido instantáneamente en una dirección opuesta al flujo de gas.

Este tipo de método es generalmente utilizado para una remoción de partículas discontinua.

Figura 7.9 Remoción por chorro de aire.



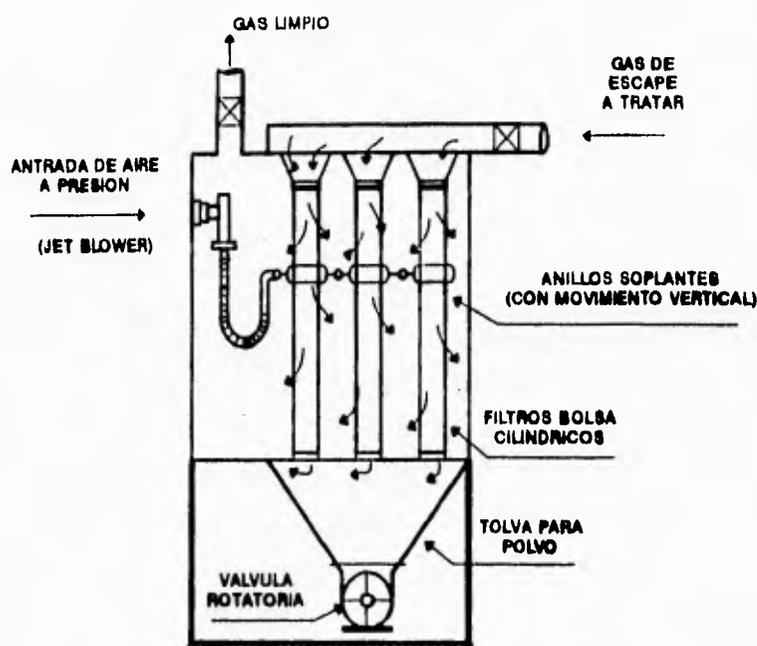
3).- Remoción por chorro de aire invertido.

Los gases de escape fluyen de dentro de los filtros hacia afuera. Este equipo contiene anillos por los cuales se inyecta el chorro de aire que viene del compresor, y con esto se desprende la capa de polvo adherida a los filtros.

Estos anillos tienen pequeños orificios en forma de boquillas y pueden ser movidos a todo lo largo de los filtros. Con este método, la tela de los filtros tiende a ser dañada por el fuerte golpe del aire, debido a esto, los filtros utilizados para este tipo de equipos son generalmente hechos de fieltro muy resistente.

Este tipo de método es generalmente utilizado para una remoción de partículas continua.

Figura 7.10 Remoción por chorro de aire invertido.



PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS.

Un PRECIPITADOR ELECTROSTATICO puede recolectar partículas muy pequeñas (partículas de polvo de $1 \mu\text{m}$ o menores). El tamaño y la eficiencia de recolección están influenciadas por las características del gas y las partículas a tratar. Este equipo puede ser operado por largos periodos de tiempo en condiciones estables con poco personal.

MECANISMO DE RECOLECCION.

Tal como se muestra en la siguiente figura 7.11, el punto de carga negativa es un electrodo de descarga, formado por un cable o alambre. El electrodo positivo es la placa recolectora del cuerpo del precipitador electrostático. Cuando se hace pasar electricidad entre los electrodos antes mencionados, se genera un campo eléctrico no uniforme. El generador de alto voltaje generalmente se conecta al electrodo de descarga. Cuando se eleva la diferencia de potencial en el campo eléctrico, el aislamiento del gas situado cerca del electrodo de descarga se rompe y se genera una corona de descarga, la cual ioniza a las moléculas del gas y se forman iones negativos y positivos. Los iones positivos se neutralizan instantáneamente por el electrodo de descarga.

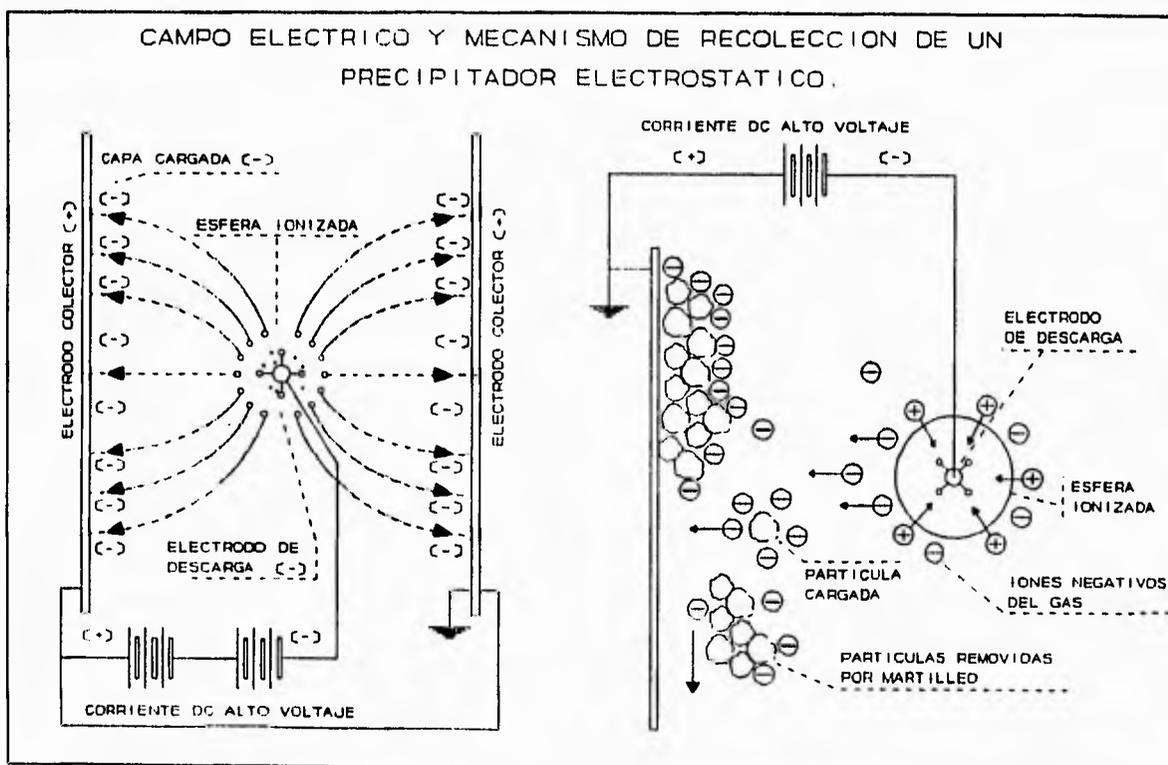
Los iones negativos y los electrones libres fluyen al electrodo de recolección (+) y sus trazas se consideran como cortinas iónicas.

Cuando el gas de escape fluye dentro del campo eléctrico, las partículas de polvo se colapsan en los iones negativos o en los electrones libres, de esta forma instantáneamente se cargan negativamente. Las partículas una vez cargadas son conducidas por las fuerzas de COULOMB al electrodo positivo donde son recolectadas.

El precipitador electrostático tiene las propiedades descritas a continuación:

- Alta eficiencia para recolectar partículas de $1\mu\text{m}$ por cohesión electrostática.
- Generalmente la velocidad del gas varía entre 0.5-1.5 m/s y la pérdida de presión se establece entre 10 y 20 mmca.
- Alta adaptabilidad a los diferentes tamaños y temperaturas de las partículas.

Figura 7.11

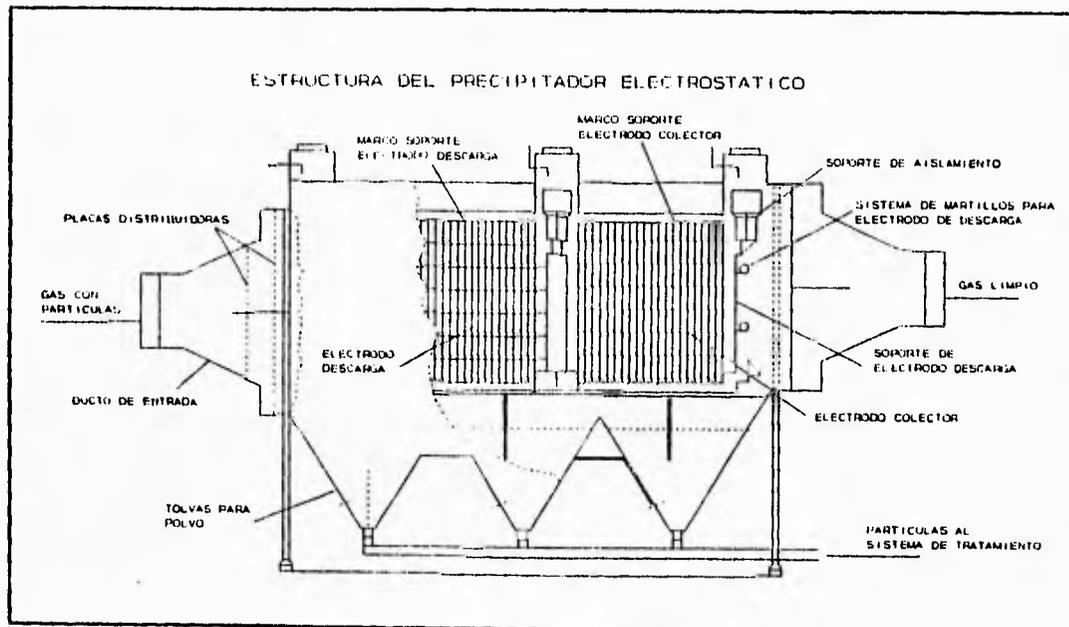


ESTRUCTURA DEL PRECIPITADOR ELECTROSTATICO.

La mayoría de los precipitadores electrostáticos son de tipo seco. Estos precipitadores cuentan con una remoción de partículas por martilleo. Los electrodos colectores son placas planas y se colocan todas en paralelo. La figura 7.12, muestra la estructura básica de este tipo de precipitadores.

- 1).- Electrodo de descarga; Donde se genera la corona de descarga.
- 2).- Electrodo colector; Las partículas cargadas se coleccionan en él.
- 3).- Sistema de martillos; Dan impactos a los electrodos colectores para remover el polvo acumulado en ellos.
- 4).- Placas distribuidoras; Para uniformizar la velocidad del gas en el cuarto de captación de partículas.
- 5).- Soporte aislador; Para aislar al electrodo de descarga de la tierra.
- 6).- Carcaza; Difusor de entrada, Cámara de captación de partículas, Difusor de salida y Tolvas para el polvo.
- 7).- Sistema de control automático; Para mantener un alto funcionamiento, este sistema controla automáticamente la descarga de la corona.
- 8).- Sistema de manejo de cenizas; Para transportar y almacenar el polvo recolectado.

Figura 7.12



LA EFICIENCIA DE RECOLECCION Y LA RESISTENCIA ELECTRICA.

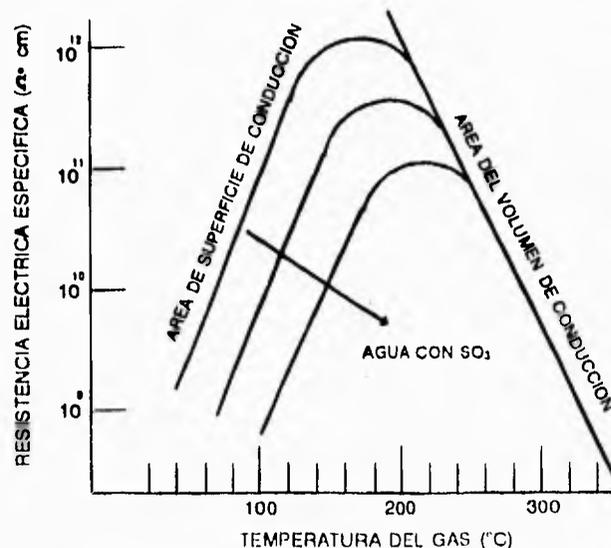
Cuando utilizamos al precipitador electrostático, la eficiencia de recolección depende grandemente de la resistencia eléctrica del polvo en el gas. Para obtener altas eficiencias se debe controlar la resistencia eléctrica dentro de un rango establecido.

La resistencia eléctrica depende básicamente de los puntos mostrados a continuación:

- 1) La temperatura del gas.
- 2) El contenido de agua y la concentración de trióxido de sulfuro contenidos en los gases de escape.
- 3) La composición de los polvos (depende de la composición del combustible cuando los gases a tratar provienen de una combustión).

La resistencia eléctrica depende de la temperatura del gas a tratar, como se muestra en la siguiente gráfica:

Gráfica 7.5 Resistencia eléctrica Vs. Temperatura del gas.

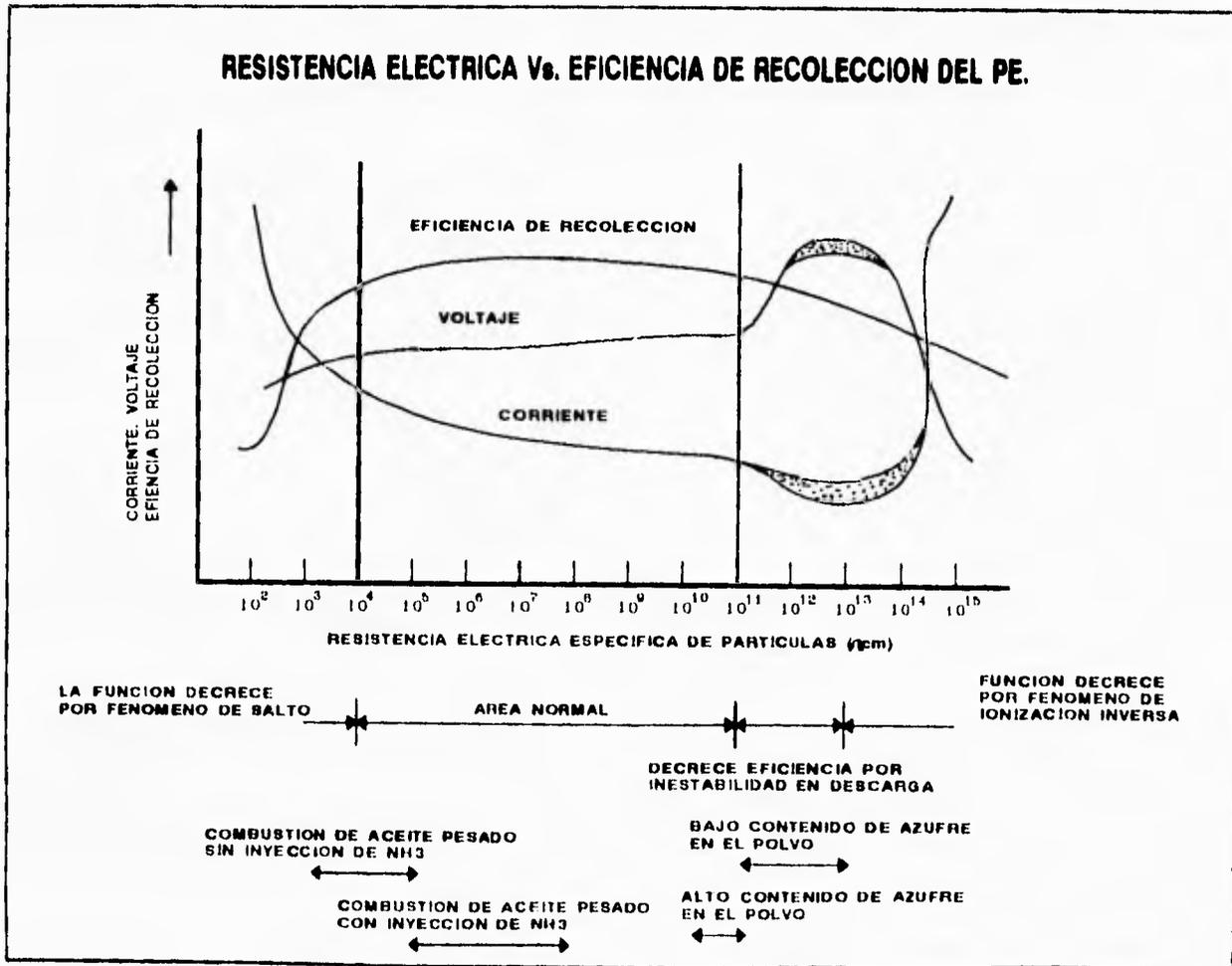


En caso de usar carbón, el máximo valor de resistencia eléctrica se registra a temperaturas de 120-180 °C. A bajas temperaturas del gas, la corriente eléctrica fluye sobre la superficie de las partículas, por lo tanto, este efecto depende del contenido de agua y trióxido de azufre que contengan las partículas. Cuando tenemos gases a muy altas temperaturas, la corriente eléctrica fluye dentro de las partículas del polvo y esto depende básicamente de la cantidad de metales alcalinos contenidos en el polvo (Na, K, etc.).

La cantidad de metales alcalinos varía de acuerdo al tipo de carbón empleado. Cuando nosotros seleccionamos el tipo de carbón, debemos considerar la eficiencia de colección de las cenizas generadas.

En el caso de usar combustóleo, los principales contenidos de las cenizas es carbono inquemado. La resistencia eléctrica de estos polvos es baja y la gravedad específica aparente también es baja. Por lo tanto, el polvo es muy ligero y vuela de los electrodos recolectores con facilidad y esto hace que la eficiencia de colección se vea decrementada. Para evitar que las cenizas se desprendan con facilidad de los electrodos, se inyecta gas de amoníaco a los gases de escape antes de que estos entren al precipitador electrostático, a causa de esto, se genera sulfato de amonio que se mezcla con el polvo y con esto incrementamos la resistencia eléctrica de las cenizas.

Gráfica 7.6



PUNTOS IMPORTANTES PARA UN PRECIPITADOR ELECTROSTATICO DE UNA CALDERA QUE UTILIZA CARBON.

Los precipitadores electrostáticos (PE) han sido usados en las carboeléctricas desde los 50's. Para obtener altas eficiencias de funcionamiento de estos equipos en contra de las altas resistencias eléctricas de las cenizas, se deben observar estos puntos:

- 1).-Las partículas de alta resistencia eléctrica se adhieren fuertemente a los electrodos recolectores. Por lo tanto, cuando el electrodo es golpeado para sacudir las partículas adheridas a él, este deberá ser diseñado para tener una alta propagación de los impactos provenientes de los martillos.
- 2).-Las características de descarga deberán ser excelentes; Debido a que con el tiempo se forma una capa de polvo que aísla al electrodo colector, la corriente de descarga se decrementa. Para lograr altos funcionamientos del equipo, se debe diseñar la forma del electrodo colector, con la cual se obtengan buenas características de descarga.
- 3).-Sistema de descarga intermitente; Para prevenir las dificultades ocasionadas al (PE) por las altas resistencias eléctricas de los polvos, se utilizan descargas intermitentes. Con esto se logra decrementar cargas acumuladas en los electrodos recolectores.
- 4).-Las cámaras de recolección de polvo deberán ser diseñadas de un tamaño suficiente para obtener altas eficiencias de recolección.

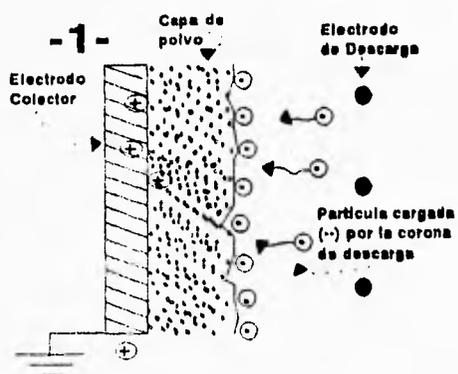
IONIZACION INVERSA.

Ionización inversa: Como se muestra en la figura 7.13, cuando se aplica una corriente eléctrica a través de la capa de polvo adherida al electrodo recolector, se genera un potencial eléctrico debido a la resistencia eléctrica del polvo.

En caso de que la resistencia eléctrica sea muy alta, la diferencia de potencial en la capa de polvo a menudo es más grande que la fuerza dieléctrica de ruptura de las partículas. En estas circunstancias, iones positivos de polaridad contraria son descargados de la capa de polvo al espacio formado entre esta capa y el electrodo de descarga. A este fenómeno se le conoce como ionización inversa.

La carga negativa del polvo que se mueve hacia el electrodo recolector es neutralizada por los iones positivos los cuales fueron descargados por la ionización inversa. Como resultado, este polvo no es recolectado por el electrodo recolector, con lo que la eficiencia de recolección se ve decrementada grandemente.

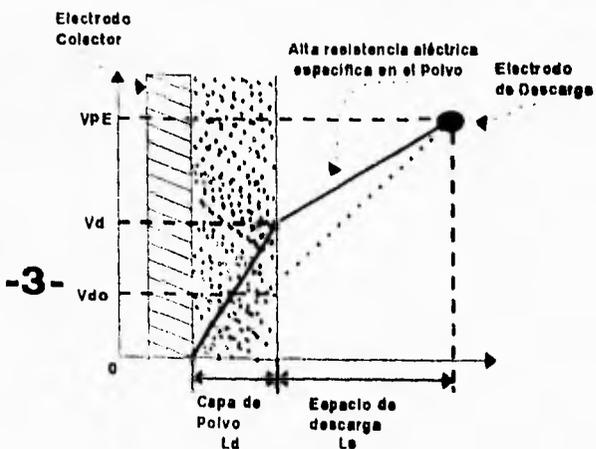
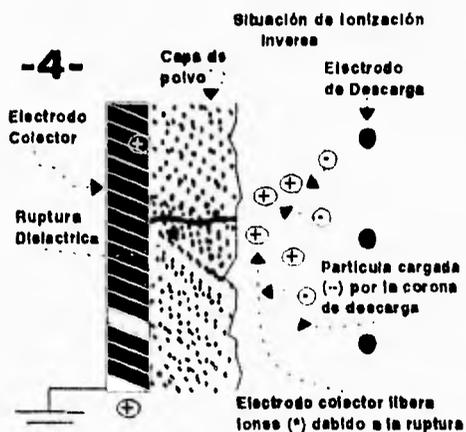
Figura 7.13 Ionización inversa.



VPE = Voltaje P.E.
 Vd = Voltaje acumulado en el Polvo con una alta resistencia eléc.
 Ld = Espesor de la capa de Polvo
 $E_d = V_d / L_d$
 Eb = Fuerza Dieléctrica de ruptura del Polvo

Inicia ionización Inversa
 $E_d > E_b$

-2- Cuando el polvo tiene una alta resistencia eléctrica específica
 En la superficie del polvo se acumula una carga negativa



MEDIDAS PARA EVITAR IONIZACION INVERSA.

- 1).-Inyección de trióxido de azufre; Cuando se usa carbón con bajo contenido de azufre, la resistencia eléctrica a menudo es alta. En este caso, se deberá inyectar trióxido de azufre al flujo de gas antes de que este entre al precipitador electrostático, con esto, la resistencia eléctrica puede ser decrementada. La cantidad de trióxido de azufre a inyectar se encuentra entre 10-30 ppm, este trióxido de azufre se une con el calcio (Ca) de las partículas y con esto es más fácil recolectar el polvo dentro del PE.
- 2).-Precipitador electrostático tipo húmedo; Este tipo de precipitador cuenta con atomizadores que inyectan agua para remover la capa de polvo formada en el electrodo colector en lugar de usar el sistema de martilleo mecánico. El polvo adherido al electrodo colector es continuamente removido por el agua, con lo que no se genera capa de polvo y por lo tanto no ocurre una ionización inversa y se puede mantener una alta eficiencia de recolección.
- 3).-Mejoramiento en el control de las descargas; Para que el PE funcione con altas eficiencias de recolección, se necesita mantener un alto voltaje de descarga. Pero cuando tenemos partículas con alta resistencia eléctrica, el voltaje debe de ser controlado (disminuido) para evitar una ionización inversa, con lo que el funcionamiento del PE se ve decrementado.

Existen otras formas para prevenir la ionización inversa y mantener un funcionamiento con altas eficiencias de recolección.

Cuando utilizamos un pulso de alto voltaje, este se descarga en un corto período de tiempo, la corona de descarga puede ser muy fuerte e igual en el electrodo de descarga. El voltaje empleado puede ser mayor que el de una descarga continua y la carga acumulada por el polvo es menor.

- 1).-Sistema de descarga intermitente; Para este tipo de sistema, el tiempo de descarga es de 10-100 ms (mili-segundos) llevándose acabo de 5-50% del ciclo. Así el voltaje de descarga se incrementa pero se disminuye sustancialmente el tiempo de descarga, con esto obtenemos grandes ahorros en el consumo de energía.
- 2).-Sistema de descarga pulsante; En este tipo de sistema, el voltaje más bajo es descargado en cortos periodos de tiempo (1-100 ms), adicionalmente se descarga un alto voltaje en ciclos de 5-100 ms, con esto se logra un funcionamiento con una alta eficiencia de recolección de partículas.

Tabla 7.2

	Descarga Normal	Otros tipos de Descargas	
	Sistema de Descarga DC	Sistema de Descarga Intermitente DC	Sistema de Descarga Pulsante DC
Métodos y Características	<pre> graph TD DC1[DC] --> Descarga1[Descarga] Descarga1 --> Ion1[Ionización Inversa Incontrolable] Ion1 --> Poder1[El Poder de Dielapción se Incrementa] </pre>	<pre> graph TD DC2[DC] --> Intermitente[Intermitente] Intermitente --> Descarga2[Descarga] Descarga2 --> Ion2[Ionización Inversa Controlable y El Poder de Dielapción se Decrementa] </pre>	<pre> graph TD DC3[DC] --> Pulas[Pulso] DC3 --> Pulas Pulas --> Pilas[Pilas de Descarga] Pilas --> Ion3[Ionización Inversa Controlable] </pre>
La Forma de la onda del voltaje de descarga		<p> $t1 = 10 \text{ a } 100 \text{ ms}$ $t2 = 20 \text{ a } 200 \text{ ms}$ </p>	<p> $t1 = 5 \text{ a } 10 \text{ ms}$ $t2 = 1 \text{ a } 100 \mu\text{s}$ </p>

PUNTOS IMPORTANTES DEL PE DE UN GENERADOR DE VAPOR DE ACEITE PESADO.

Las cenizas generadas por una caldera de aceite pesado, en su mayoría son formadas por carbono inquemado. Los tamaños de las partículas por lo general son menores a las generadas por usar carbón.

Estas partículas de carbono inquemado tienen una menor resistencia eléctrica y menor gravedad específica aparente, debido a esto, el polvo tiende a desprenderse con facilidad del electrodo colector con lo que la eficiencia de recolección se afecta negativamente.

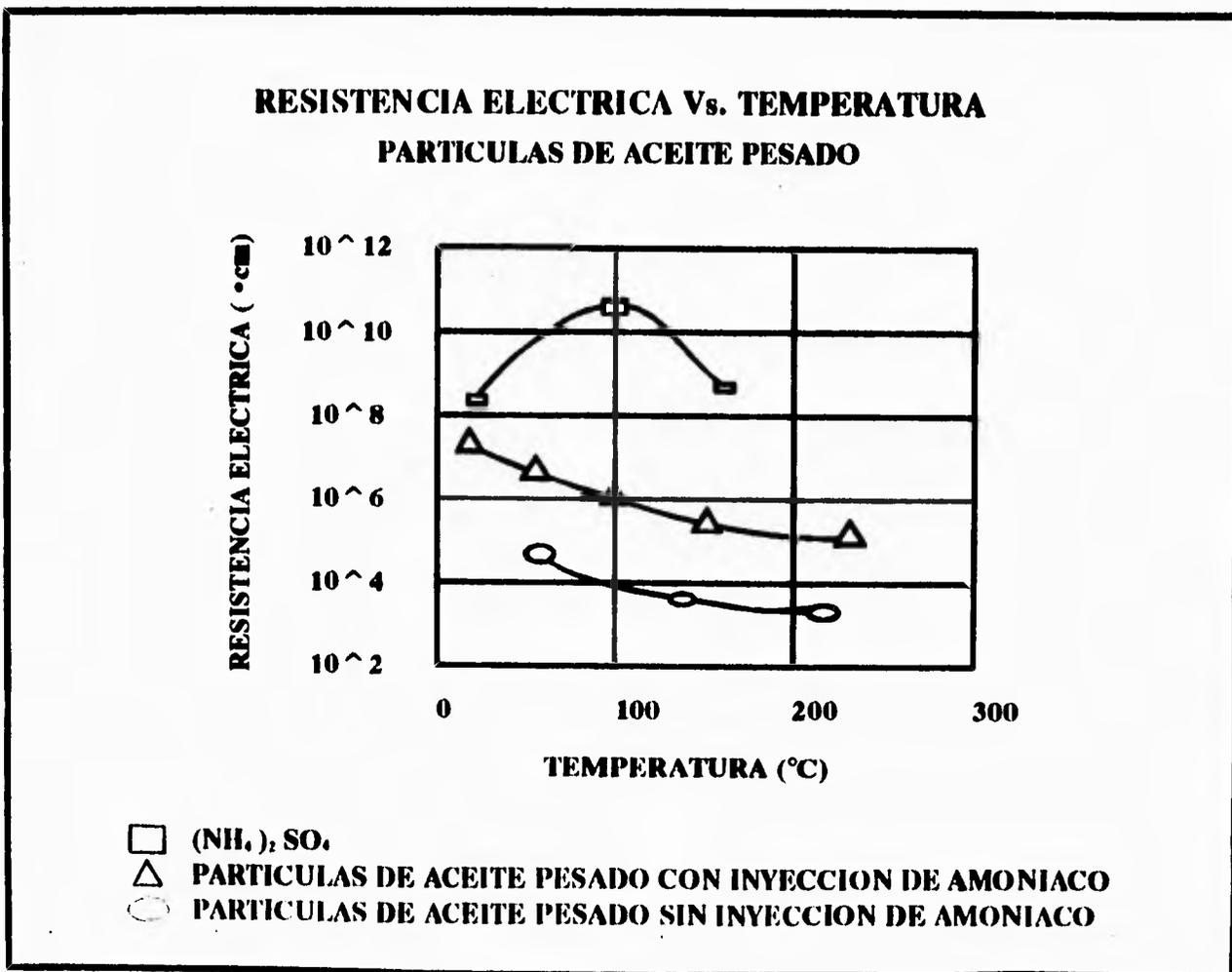
Para prevenir que el polvo vuele dentro del PE, se inyecta gas de amoníaco a la corriente de gas de escape antes de que este entre dentro del precipitador electrostático. Con esto obtenemos sulfato de amonio combinado con el polvo. La resistencia eléctrica se incrementa logrando incrementar la eficiencia de recolección.

Un punto importante en este procedimiento, es el control en la inyección de amoníaco al gas de escape. Si la inyección de amoníaco es insuficiente, se genera un ácido de sulfato de amonio el cual es sumamente corrosivo y con un alto valor de adhesión. Como resultado de esto, causamos atascamientos y corrosión en los electrodos.

Cuando la resistencia eléctrica es muy baja, el polvo no tiene una gran fuerza de adhesión y cuando el martillo golpea al electrodo colector el polvo vuela por toda la cámara del PE haciendo difícil la recolección de este. Para prevenir esto, la cámara de recolección es dividida con 3 o 4 mamparas las cuales cuentan con entradas y salidas individuales.

Cuando impactamos al electrodo recolector por medio de los martillos, evitamos que las partículas vuelen al cerrar las mamparas.

Gráfica 7.7



CONCLUSIONES.

Dada la magnitud de la contaminación del aire en las principales zonas urbanas de nuestro país y especialmente en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, es necesario mantener una evaluación del impacto global, de los patrones de exposición y una caracterización del riesgo potencial en la salud humana.

Para realizar un análisis más exacto del comportamiento de los contaminantes en el aire, es necesario contar con una red de monitoreo, la cuál, se base en estudios de distribución espacial y temporal de los contaminantes, y que se incremente el número de estaciones en funcionamiento.

Es importante promover la investigación tanto local como regional de la contaminación atmosférica, como base de partida para el desarrollo de estrategias preventivas, como sustento para la planeación de la protección al medio ambiente y el bienestar humano.

Es indudable que se ha actuado con políticas de carácter emergente y no previsoras, por lo que ahora, las posibles soluciones del problema pueden tener un alto costo económico, político y social.

Debido a que las disposiciones legales y reglamentarias no están a la altura de la dimensión del problema, se deberá formular un plan integral a mediano y largo plazo que tenga continuidad a través de los períodos administrativos y que involucre a todos los sectores sociales y gubernamentales del país.

Mientras existan limitaciones tecnológicas, de infraestructura urbana y de planeación a largo plazo, los factores principales de la contaminación atmosférica seguirán siendo; el transporte, la creciente explosión demográfica y la industria.

Dada la situación económica actual por la que atraviesa la industria mexicana, es necesario que se tenga un buen control en las condiciones de operación de sus equipos, ya que es posible conseguir importantes reducciones en las emisiones contaminantes, con simples modificaciones en la operación de sus equipos, sin representar altas inversiones para la empresa.

Es necesario que la industria cuente con una planeación integral que parta desde la modificaciones en la operación de sus equipos, hasta la implementación de equipos especializados para el tratamiento de emisiones contaminantes.

Es indispensable fomentar la investigación y desarrollo de fuentes alternas de energía, promover el ahorro de energía en todos los sectores y la cogeneración.

La solución al problema de la contaminación atmosférica, no se dará en el corto plazo, debido, entre otras muchas cosas, al patrón del consumo actual de hidrocarburos. Por lo consiguiente, es importante desarrollar recursos humanos capacitados técnicamente para llevar a cabo el control de las actividades relacionadas a este tema, además es necesario promover una cultura energética y ecológica hoy, para poder respirar una aire limpio mañana.

BIBLIOGRAFIA

LIBROS:

"Air pollutants and their effects on the terrestrial ecosystem"
Legge, Krupa.

"Air pollution Engineering Manual"
NAPCA.
Washington, D.C.: HEW.

"Contaminación del aire (origen y control)"
Kenneth Wark, Cecil F. Warner.
Editorial Limusa.

"Control techniques for nitrogen oxides from estationary sources"
NAPCA.
Washington, D.C.: HEW.

"Industrial electrostatic precipitation"
H. J. White.
Addison-Wesley.

"Industrial gas cleaning"
W. Strauss.
Pergamon Pres.

"La ciudad de México y la contaminación atmosférica"
Quadri, Sánchez.
Editorial Limusa.

"Standard Handbook of power plant engineering"
William, Ellison.
Editorial MacGraw-Hill.

REVISTAS:

"Control techniques for sulfur oxide air pollutants"
Public Health Service.
Washington, D.C.

"Country report for the group training course in environmental administration"
Japan International Cooperation Agency, (JICA).

"Efectos del clima urbano sobre los niveles de contaminación en la ciudad de México"
E. Jáuregui.
Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México, 1988.

Environmental scientific technology
Vol. 25 No. 4, 1991.

Scientific American
Vol. 269 No. 4, octubre 1993.

Wartsila Diesel

PUBLICACIONES OFICIALES:

Norma Oficial Mexicana NOM-CCAT-019-ECOL/1993.

"Programa integral contra la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de la ciudad de México"
(Avance de junio de 1994).

"La contaminación atmosférica en México, sus causas y efectos en la salud"
Comisión Nacional de Derechos Humanos.

"Sulfur oxide removal from power plant stack gas"
National Technical Information Service.
PB-196 804, PB-222 509