

155
24.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO SOBRE LAS EMISIONES CONTAMINANTES
AL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA
CIUDAD DE MEXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA MECANICA)

P R E S E N T A :
TARSICIO ALEJANDRO RUIZ FLORES

DIRECTOR DE TESIS: M. I. FELIPE MUÑOZ GUTIERREZ

MEXICO, D. F.

1997.

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.

RESUMEN

En este trabajo se cuantificaron las emisiones contaminantes en la zona metropolitana de la ciudad de México, por los automotores en circulación, las industrias y evaporaciones. Las emisiones se determinaron haciendo uso de la siguiente información: número y tipo de vehículos en circulación, kilometraje recorrido por categoría de vehículos, consumo de combustibles por el transporte, la industria y los servicios y factores de emisión para automotores y procesos de combustión. Para complementar el inventario de emisiones se hizo uso de estudios ya realizados sobre emisiones de partículas por fuentes naturales, emisiones por vegetación, fugas de gas LP y por el empleo de solventes en actividades al aire libre. El inventario de emisiones se comparó con los inventarios obtenidos en 1989 y 1994 por las dependencias oficiales, encontrando diferencias notables. En la bibliografía del trabajo se muestran las referencias utilizadas.

INDICE

Capítulo I Introducción	1
Antecedentes	1
Características de la ciudad de México	2
Planteamiento	3
Capítulo II Tipos de contaminantes	6
Clasificación de los contaminantes	6
Dióxido de azufre	7
Dióxido de nitrógeno	9
Oxidos de carbono	12
Partículas suspendidas totales	12
Hidrocarburos	15
Oxidantes fotoquímicos	16
Monitoreo ambiental	17
Capítulo III Fuentes de contaminación del aire	19
Causas	19
Calidad de combustibles	19
Tecnología de combustión y control de emisiones	20
Transporte	21
Clasificación	22
Fuentes fijas y móviles	23
Emisiones evaporativas	26
Capítulo IV Determinación de las emisiones	29
Emisiones evaporativas de gasolina	29
Emisiones por procesos de combustión en fuentes fijas	45
Emisiones por fuentes móviles	49
Capítulo V Conclusiones y recomendaciones generales	61
Discusión de resultados	61
SO ₂ , CO, HC, NO _x y PST	61
Recomendaciones generales	63
Bibliografía	66

CAPITULO I. INTRODUCCION

Antecedentes.

El desarrollo industrial en cualquier comunidad, ciudad o país, irremediablemente está asociado con la contaminación y degradación del ambiente; los beneficios de la sociedad tecnológica son directamente culpables de romper el equilibrio ecológico en la comunidad.

En el pasado la industria encontro que era más fácil y económico descargar hacia la atmósfera los productos de deshecho de sus procesos sin realizar alguna inversión económica para el control de estas emisiones, dando origen a la contaminación ambiental.

Las primeras noticias de un desarrollo industrial en México datan del siglo XIX, cuando dan inicio la industria textil, del cemento, de alimentos entre algunas otras, con un aumento en la década de los cuarenta debido a la escasez de bienes manufacturados a causa del conflicto mundial en esa década.

En los años cincuentas y sesentas, el desarrollo industrial se limitó a satisfacer las necesidades internas con pequeñas plantas industriales, sacrificando involuntariamente la calidad de los productos, haciendo difícil su competencia en el mercado internacional.

El desarrollo industrial ha tenido costos sociales y ambientales, entre los cuales son responsables la contaminación y el deterioro ambiental de la ciudad de México que, como es sabido, es una de las más contaminadas del mundo. Este deterioro ambiental se puede atribuir al crecimiento industrial, al del autotransporte y a la cada vez mayor demanda de energía eléctrica, todo esto debido a la explosión demográfica de la ciudad, sin pasar por alto que, algunas veces, en el desarrollo industrial se han utilizado tecnologías de importación, por lo general obsoletas, que no contaban con sistemas de control de emisiones contaminantes, que en su mayoría eran ineficientes y por lo mismo grandes consumidoras de energía, trayendo con ello mayores emisiones contaminantes.

Los vehículos de combustión interna, principalmente el automóvil, en menos de dos décadas se convirtieron en el principal generador de emisiones contaminantes. En los años setenta se consideraba que no emitían más de la mitad de la contaminación, pero a partir de los ochenta pasaron a ocupar el primer lugar. Los diagnósticos de diversas dependencias públicas realizados entre 1982 y 1990 les asignaban del 50 al 75 % del total de las emisiones. La contaminación por vehículos automotores es hoy un problema crítico. Su origen es particularmente complejo, pues es fruto de la cantidad, y en algunos casos, la calidad de los combustibles utilizados, el tipo y antigüedad de los autos, la lentitud de circulación vial (debido al gran número de automotores actuales) y de las condiciones geográficas de la ciudad de México. Entre 1950 y 1990 el número de vehículos en el D.F. aumentó más de 24 veces, mientras que la población lo hizo en una menor proporción.

Otro problema son los contaminantes productos de elementos reactivos, de enorme peligrosidad para la salud y el ambiente. Sobre los efectos nocivos que éstos originan existen en algunos casos estudios puntuales, que no dejan ninguna duda sobre su enorme peligrosidad, la cual crece día con día ante la aparición de nuevos procesos tecnológicos para elaborar productos químicos y petroquímicos.

Características de la ciudad de México.

La ciudad de México se extiende sobre una superficie de más de 1200 kilómetros cuadrados, abarcando el Distrito Federal y diecisiete municipios conurbados del estado de México. Este territorio es cincuenta veces mayor que a principios del siglo, cuando la metrópoli solamente ocupaba 24 kilómetros cuadrados, al mismo tiempo la población se ha multiplicado.

En la zona metropolitana de la ciudad de México (ZMCM) habitan actualmente alrededor de 20 millones de personas, lo que representa una población doce veces mayor que la existente a principios de la década de los años cuarenta, cuando únicamente había un millón y medio de habitantes.

La ciudad de México se encuentra a una altura de 2240 metros sobre el nivel del mar, por lo que la densidad del aire es menor que a nivel del mar (esto hace que los procesos de combustión sean menos eficientes y produzcan por tanto una mayor cantidad de contaminantes), la ciudad está rodeada por las montañas de las sierras del Ajusco, Chichinautzin, Nevada, Las cruces, Guadalupe y Santa Catarina, las que constituyen una barrera física natural para la circulación del viento, impidiendo el desalojo del aire contaminado.

La ciudad presenta con frecuencia inversiones térmicas que provocan el estancamiento de los contaminantes. Por las mañanas, la capa de aire próxima a la superficie del suelo adquiere una temperatura menor que las capas superiores, por lo que se vuelve más densa y por lo mismo más pesada, entonces la capa de aire que se encuentra a mayor altura actúa como una cubierta que impide el movimiento ascendente del aire contaminado.

Es de importancia mencionar que la ciudad recibe una abundante radiación solar debido a su latitud, lo que hace que su atmósfera sea demasiado fotorreactiva. En presencia de la luz solar, los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno reaccionan fácilmente para formar ozono y otros oxidantes.

La calidad del aire en el valle de México responde a procesos dinámicos. En un día determinado, las concentraciones de contaminantes en la atmósfera dependen fundamentalmente de la calidad del aire del día anterior, de manera más precisa, de los contaminantes residuales que no se dispersaron el día anterior. El grado de acumulación de contaminantes de un día para otro dependerá a su vez de factores meteorológicos como temperatura, velocidad y dirección del viento.

Planteamiento.

El problema de la contaminación atmosférica en la ZMCM ha sido estudiado intensamente en los últimos treinta años. Investigadores de diversos organismos han realizado estudios sobre sus causas y efectos, proponiendo métodos de control a la vez. El objetivo de los primeros estudios era averiguar cual de las fuentes de contaminación (fijas o móviles) era responsable de la mayor parte del problema; actualmente es ya sabido que la mayor aportación viene de las fuentes móviles.

La mayoría de los trabajos sobre contaminación atmosférica tratan a ésta en una forma global. Pocos son los trabajos que muestran un inventario de emisiones contaminantes en la ZMCM, éstos han sido realizados o financiados por dependencias oficiales con el afán de tener una noción de la magnitud de la generación de contaminantes.

El presente trabajo tiene el objetivo de realizar un inventario de emisiones a la atmósfera por fuentes fijas y móviles y que ofrezca un panorama confiable acerca de la magnitud del problema; y para ello se hará uso de la información más reciente acerca del consumo de combustibles, factores de emisión de los automotores en circulación, factores de emisión por procesos de combustión; número, tipo y recorridos promedio de los automotores, número de viajes-persona-día y de pasajeros por tipo de transporte en la ZMCM. Posteriormente se comparan los datos obtenidos con los datos de las dependencias oficiales, señalando las diferencias entre ellos y las posibles causas de éstas. Con los resultados logrados, este trabajo pretende contribuir a las políticas de planeación y reducción de las emisiones de contaminantes al aire que redunde en un mejor nivel de vida en la ZMCM.

En la atmósfera de la ciudad de México se encuentra presente una amplia variedad de sustancias contaminantes, entre las más importantes (que tomaremos en cuenta para nuestro trabajo) se encuentran el bióxido de nitrógeno, bióxido de azufre, monóxido de carbono, hidrocarburos, partículas suspendidas y el ozono. En el caso del ozono resulta irónico que a 25 km de altura (en promedio) es de gran utilidad sirviendo como escudo protector de los rayos solares ultravioleta permitiendo la vida en el planeta, pero cuando el ozono se encuentra en el aire que respiramos resulta nocivo para la salud.

Así pues, el segundo capítulo presenta las sustancias contaminantes de importancia, mencionando también algunas de sus características.

Para evaluar las condiciones de contaminación atmosférica en la ciudad de México es importante conocer el origen de este problema, es decir, las fuentes de contaminación, las causas de las mismas, señalando claramente el consumo deficiente de energía. El tercer capítulo hace la distinción entre fuentes de contaminación antropogénicas y naturales, siendo las primeras las causadas por el hombre (que a su vez se dividen en fuentes fijas y móviles);

las segundas tienen lugar en tolvaneras, emisiones por vegetación y erupciones volcánicas.

En el cuarto capítulo se describe la estimación de las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Para lo cual se utilizará la información mencionada anteriormente. Se debe mencionar que este inventario es realizado con los medios al alcance, por lo cual para emisiones por vegetación, suelos, empleo de solventes en diversas actividades al aire libre y fugas domésticas de gas LP se utilizarán los resultados de estudios ya realizados, los cuales son referidos en este mismo capítulo.

Un aspecto importante de cualquier trabajo es la conclusión a la que se llega, las de este trabajo se mencionan en el capítulo cinco; también se hacen recomendaciones para el control de la contaminación, sin olvidar que el problema de la contaminación no tiene solución a corto plazo.

CAPITULO II. TIPOS DE CONTAMINANTES

A pesar de que hay gran diversidad de sustancias capaces de permanecer en el aire, se consideran como contaminantes atmosféricos aquellas sustancias que se encuentran en determinada cantidad o en ciertas combinaciones y en un lapso suficiente para afectar el equilibrio en la vida humana, de animales, plantas o incluso llegar a deteriorar materiales.

En la actualidad la contaminación del aire (que alguna vez fue un problema exclusivo del mundo industrializado) está afectando a los grandes centros urbanos de la mayoría de los países en desarrollo. Los causantes principales de este fenómeno son entre otros: el uso de combustibles impuros, la cantidad de automotores, el deficiente mantenimiento vehicular, los procesos industriales y la falta de aplicación de los reglamentos en materia de calidad del aire.

En la ciudad de México los contaminantes generados se atribuyen en su mayoría al uso de combustibles como la gasolina, diesel, gas natural o combustóleo.

Las sustancias consideradas normalmente como contaminantes atmosféricos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- 1.- Partículas en suspensión.
- 2.- Compuestos de azufre.
- 3.- Compuestos que contienen nitrógeno.
- 4.- Monóxido de carbono.
- 5.- Compuestos orgánicos.
- 6.- Compuestos halogenados.
- 7.- Compuestos radiactivos.
- 8.- Compuestos oxidantes.

La materia particulada la forman polvos de diferente diámetro, el polvo fino está compuesto por partículas de menos de 100 μm , vapores entre 0.001-1 μm y neblinas entre 0.1-10 μm de diámetro. Los vapores son partículas formadas por condensación, sublimación o reacción química, a veces son designados como humos.

Estos vapores, humos y neblinas caen dentro de la clase de aerosoles. La lista de contaminantes se puede agrupar en dos tipos o clases de contaminantes: contaminantes primarios y contaminantes secundarios.

Los contaminantes primarios son los que permanecen en la atmósfera tal y como fueron emitidos por la fuente de contaminación. Los contaminantes secundarios son los que han estado sujetos a cambios químicos, o bien, son el producto de la reacción de dos o más contaminantes primarios en la atmósfera, entre éstos destacan los oxidantes fotoquímicos y algunos radicales de corta existencia como el ozono, pero con un alto potencial para dañar la salud.

La clasificación de los contaminantes gaseosos del aire se muestra en la tabla 2.1 [1].

Tabla 2.1. Contaminantes gaseosos del aire.

Clase	Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Compuestos que contienen azufre	SO ₂ , H ₂ S	SO ₃ , H ₂ SO ₄
Compuestos que contienen nitrógeno	NO, NH ₃	NO ₂ , O ₃
Oxidos de carbono	CO	ninguno
Compuestos orgánicos	todos del 1 al 4	ácidos, cetonas
Compuestos halogenados	HCL, HF	ninguno

Los compuestos halogenados se originan en operaciones de la industria química y metalúrgica.

En este trabajo se evaluarán solamente las siguientes emisiones contaminantes: dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, hidrocarburos no metano y partículas, ya que las consideramos de mayor importancia.

Dióxido de azufre (SO₂).

El azufre es un componente del petróleo y carbón natural, con una concentración que varía de 0.1 a más del 5 %.

Las emisiones de óxidos de azufre (SO_2 y SO_3) son generadas durante la combustión por oxidación del azufre contenido en el combustible predominando el SO_2 . Las emisiones de SO_x no controladas son casi enteramente dependientes del azufre contenido en el combustible y no afecta el tamaño de la caldera o el diseño del quemador.

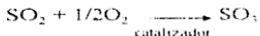
En promedio más del 95 % del azufre en el combustible es convertido en SO_2 , entre el 1 y el 5 % restante es posteriormente oxidado a trióxido de azufre (SO_3) y alrededor del 1 al 3 % es emitido como partículas sulfatadas.

La reacción global de formación de dióxido de azufre a partir de azufre es:



Esta reacción es altamente exotérmica. Además de SO_2 , se forma una pequeña cantidad de trióxido de azufre (SO_3) en la reacción de la combustión.

El SO_2 gaseoso tiene alta capacidad para reaccionar, ya sea fotoquímica o catalíticamente, con otros contaminantes atmosféricos; puede formar trióxido de azufre, ácido sulfúrico, diversas sales del ácido sulfúrico y sulfatos, por ejemplo:



Cuando predomina un alto contenido de humedad en la atmósfera ocurren estas dos reacciones:



Se forman pequeñas gotas de ácido sulfúrico, que además de ser altamente corrosivas, tienden a reducir la visibilidad; estas reacciones son causantes del fenómeno de la lluvia ácida.

Hay varios efectos de la lluvia ácida que son inquietantes. Existe una acidificación de las fuentes naturales del agua. Esto puede tener un efecto devastador sobre la vida de los peces; el efecto sobre la tierra es importante así como la mencionada corrosión de materiales con los que entra en contacto.

Dióxido de nitrógeno (NO₂).

El dióxido de nitrógeno (NO₂) es un gas pardo rojizo y es muy visible cuando está presente en una cantidad suficiente. No se conocen del todo los efectos toxicológicos ni epidemiológicos del NO₂ sobre los seres humanos. Por lo que se sabe, el NO₂ no es un contaminante primario en el sentido de que afecta en forma directa la salud humana, a menos que la concentración sea muy elevada, pero como se mencionó anteriormente la relevancia que tienen los dióxidos de nitrógeno es que son los causantes de la formación del ozono. El límite de umbral en el ambiente ha sido considerado de 5 ppm para la exposición diaria. Más del 90 % de los óxidos de nitrógeno producidos por el hombre son a causa del consumo de combustibles.

Existen dos fuentes de nitrógeno que contribuyen a la formación de óxidos de nitrógeno en las reacciones de la combustión: el aire es una fuente importante en la reacción combustible-aire, debido a que contiene N₂ y O₂ moleculares, los combustibles que contienen N₂ en su estructura son causantes de una apreciable fracción del nitrógeno final en NO_x. Principalmente, son importantes el combustóleo y el carbón como otra fuente, ya que el gas natural está esencialmente libre de compuestos del tipo nitrógeno.

Las dos reacciones globales de importancia son aquellas que producen NO y NO₂.

En estas reacciones el oxígeno (O_2) y nitrógeno (N_2) reaccionan para formar NO, el cual por ser inestable al entrar a la atmósfera reaccionará con el oxígeno para formar NO_2 . Siendo estas dos reacciones reversibles. A la temperatura convencional de combustión (mayor de 1500 °K) es posible una formación apreciable de NO, con cantidades despreciables de NO_2 . Durante un proceso real de combustión, ocurre que el gas enfriado a la salida consiste principalmente de NO, a pesar que la forma ambiental o global del contaminante NO_x es NO_2 .

Aproximadamente del 90 al 95 % de los NO_x emitido en los procesos de combustión aparecerá como NO, siendo este inestable según entra al medio ambiente y cae su temperatura.

Según cae la temperatura por debajo de los 1550 °K las velocidades de las reacciones son muy pequeñas; por tanto, la concentración final de los NO_x en los gases producto de la combustión queda constante en los valores obtenidos a altas temperaturas. La cantidad de NO_2 que se forma a bajas temperaturas es muy pequeña. Por tanto, el NO formado en la combustión a altas temperaturas es expulsado hacia el ambiente y la reacción de oxidación de NO a NO_2 tiene lugar en la atmósfera durante un periodo dictado por la cinética de las reacciones [2].

Los dos parámetros importantes en la formación de los NO_x son la temperatura y el tiempo. Es necesario entonces evitar los picos de temperatura así como reducir al mínimo el tiempo de residencia con las temperaturas pico.

Los NO_x que se forman durante la combustión son el producto de la oxidación de nitrógeno atmosférico, o bien de la oxidación del nitrógeno orgánico del combustible.

En el primer caso, la producción de NO_x se favorece a medida que aumenta la temperatura y como resultado de esta dependencia, la producción de NO y NO_2 es función también de la relación A/C, es decir, de la proporción que guardan el aire y el combustible en la mezcla, esto último se ilustra en la figura 2.1 [2].

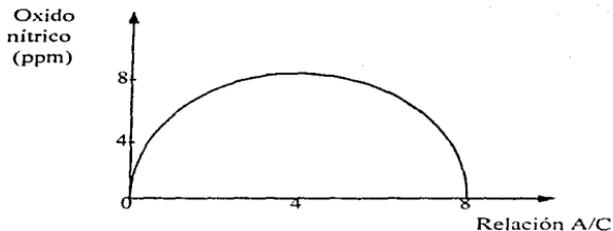


Figura 2.1. Efecto de la relación aire/combustible sobre la cinética del óxido nítrico (NO).

Bajo condiciones ricas (de alta proporción de combustible), disminuyen los niveles de O_2 y la temperatura, por lo que la producción de NO_x también es baja. A medida que aumenta la relación A/C, la temperatura aumenta y la producción de NO_x se incrementa hasta un máximo, a partir del cual tiende a reducirse la temperatura de la flama debido a la dilución con el exceso de aire y por lo tanto, los niveles de NO_x disminuyen progresivamente.

En realidad la cantidad de NO_2 producida directamente en la flama es pequeña (entre 0.5 y 10 % de la emisión total de NO_x) debido a que las altas temperaturas del proceso limitan su producción a partir del NO. No obstante, éste se convierte posteriormente en NO_2 a tasas moderadas en aire limpio y rápidamente en aire contaminado.

En algunos combustibles la oxidación del nitrógeno orgánico puede contribuir significativamente a las emisiones de NO_x , lo cual depende del contenido de nitrógeno y del tipo de enlace que presenta. Algunos estudios sugieren que el NO se forma más fácilmente a partir de nitrógeno combinado que de N_2 atmosférico. En todo caso es conveniente incluir estas consideraciones en el análisis y en los programas de control de calidad de los combustibles.

Oxidos de carbono (CO y CO₂).

El CO representa un subproducto de la combustión incompleta. Idealmente, los únicos productos finales de una combustión completa de combustibles fósiles son el dióxido de carbono (CO₂) y el agua (H₂O). Sin embargo, en las máquinas de combustión y en la mayoría de los quemadores estacionarios, la dinámica de la proporción de aire empleado como comburente en la mezcla con el combustible (la ya conocida relación aire-combustible A/C) y la misma operación de estos sistemas impiden la oxidación total. Como resultado se emite una mezcla de combustible no quemado, hidrocarburos de menor orden producidos en la flama, hidrocarburos parcialmente oxidados a través de la corriente de extracción, monóxido de carbono y agua. La proporción de dichos gases en la mezcla depende de manera significativa de la relación A/C y en menor grado, del tiempo de ignición, del diseño de la cámara de combustión y del tipo de combustible. En la actualidad se desconoce parcialmente la cinética de la oxidación del carbono.

La principal forma de reducir el CO₂ es disminuyendo el uso de combustibles fósiles. Debido a que en la actualidad esto no es viable a gran escala, han surgido varios métodos experimentales de control; todos ellos parten del principio de tratar de secuestrar el CO₂.

A nivel mundial no se ha observado un cambio significativo en las concentraciones de CO atmosférico durante los últimos 20 años, a pesar de que la contribución antropogénica se ha duplicado en el mismo periodo. Los mecanismos que con mayor probabilidad explican esta pérdida aparente de CO son la reacción con radicales de hidroxilo para formar dióxido de carbono y la remoción por los microorganismos del suelo; ambos mecanismos son capaces de absorber y transformar una cantidad de CO equivalente a su producción.

Partículas suspendidas totales (PST).

Las partículas representan un riesgo para los pulmones, reducen la visibilidad y por lo mismo la radiación solar, trayendo como consecuencia cambios en la temperatura ambiental y en las tasas biológicas de crecimiento de las plantas, además ensucian la superficie del suelo y edificios.

En la tabla 2.2 se da una definición de los términos que describen las partículas suspendidas en el aire.

Tabla 2.2. Tipos de partículas.

Partículas	Cualquier material, excepto agua no combinada, que existe en estado sólido o líquido en la atmósfera o en una corriente de gas en condiciones normales.
Aerosol	Una dispersión de partículas microscópicas, sólidas o líquidas en medios gaseosos.
Polvo	Partículas sólidas de un tamaño mayor que el coloidal, capaces de estar en suspensión temporal en el aire.
Ceniza fina	Partículas de ceniza finamente divididas arrastradas por el gas de la combustión. Las partículas pueden contener combustible no quemado.
Niebla	Aerosol visible.
Vapores	Partículas formadas por condensación, sublimación o reacción química predominantemente mayores de 1 μm .
Neblina	Dispersión de pequeñas gotas de líquido de suficiente tamaño como para caer desde el aire.
Humo	Partículas pequeñas arrastradas por los gases que resultan de la combustión.
Hollín	Una aglomeración de partículas de carbón.

Características y composición de las partículas atmosféricas.

Se pueden agrupar a las partículas atmosféricas en dos grandes tipos principales: partículas gruesas (mayores de 2 μm) y partículas finas (menores de 2 μm).

La distribución del volumen (o masa) de las partículas finas puede encontrarse en dos modos, las partículas en el modo llamado núcleo (que incluye partículas de 0.005-0.05 μm de diámetro) se forman cerca de las fuentes de emisión por condensación de vapores producidos por procesos a altas temperaturas, tales como la combustión de combustibles fósiles.

Las partículas en el modo acumulación (que incluye partículas de 0.05-2 μm), se forman principalmente por coagulación o crecimiento mediante condensación de vapor de las partículas de vida corta del modo llamado núcleo. Las partículas en el modo acumulación no crecen hasta llegar al modo de partícula gruesa.

Las partículas gruesas se forman por procesos mecánicos como molido, triturado, etc, e incluyen la resuspensión del polvo superficial. Las partículas atmosféricas también pueden clasificarse (como los demás contaminantes) en primarias y secundarias. Las partículas primarias son descargadas directamente a la atmósfera de las fuentes de contaminación antropogénicas o naturales. Las secundarias se forman por reacciones físicas y químicas en la atmósfera, y la mayoría de los reactantes son emitidos al aire como contaminantes gaseosos.

En la atmósfera, el crecimiento de las partículas y la transformación química ocurre a través de las interacciones gas-partícula y partícula-partícula. Las interacciones gas-partícula incluyen la condensación de moléculas de baja presión de vapor, como ácido sulfúrico (H_2SO_4) y compuestos orgánicos, estas condensaciones ocurren principalmente en las partículas finas.

La única interacción importante partícula-partícula es la coagulación entre partículas finas.

Los principales componentes de las partículas atmosféricas son los sulfatos, los nitratos, el material carbonáceo, el amonio, el plomo y otros metales pesados. Las partículas gruesas consisten principalmente de óxidos de silicio, de aluminio, de calcio, magnesio y hierro, así como carbonato de sodio y otras sales, materiales como partículas de llantas y partículas vegetales como polen y esporas.

Los componentes carbonáceos de las partículas finas contienen carbón elemental (grafito y hollín) y compuestos orgánicos (hidrocarburos emitidos de las fuentes de combustión y compuestos orgánicos secundarios formados por reacciones fotoquímicas).

En muchas áreas urbanas y no urbanas, estas especies pueden constituir las partículas más abundantes después de las formadas por sulfatos. Las partículas orgánicas secundarias se forman por oxidación de las orgánicas primarias, en un ciclo que involucra también al ozono y a los óxidos de nitrógeno. Las reacciones atmosféricas de los óxidos de nitrógeno producen ácido nítrico gaseoso (HNO_3) que puede acumularse como partículas de nitrato en los modos fino y grueso.

La combustión puede producir cuatro tipos diferentes de partículas que se forman de los siguientes modos: el calor puede vaporizar materiales que se condensan posteriormente, produciendo partículas entre 0.1 y $1 \mu\text{m}$, las reacciones químicas del proceso de la combustión pueden producir partículas de cúmulos moleculares inestables de corta duración por debajo de aproximadamente $0.1 \mu\text{m}$; los procesos mecánicos pueden liberar cenizas o partículas de combustible de $1 \mu\text{m}$ o mayores, si intervienen aspersores de combustibles líquidos puede que se escape ceniza muy fina y la combustión parcial de los combustibles fósiles puede producir hollín.

Hidrocarburos.

Los hidrocarburos en la atmósfera incluyen hidrocarburos 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. Otros procesos donde se emiten son la manufactura química, la refinación del petróleo y la operación metalúrgica.

Los hidrocarburos que comúnmente se encuentran en el aire ambiente son: metano, etano, acetileno, propano, propileno, butano, isobutano, pentano, isopentano, hexano, benceno y otros compuestos.

La principal razón para el control en las emisiones de hidrocarburos (a parte obviamente de sus efectos tóxicos) radica en que son precursores de los oxidantes fotoquímicos al igual que los óxidos de nitrógeno.

Oxidantes fotoquímicos.

Los oxidantes fotoquímicos son contaminantes secundarios, es decir, no son descargados directamente a la atmósfera sino que se forman a través de una serie de reacciones químicas catalizadas por la radiación solar. De éstos, el ozono es el compuesto más abundante en la atmósfera urbana. La interacción del monóxido y dióxido de nitrógeno con moléculas disociadas de oxígeno se realiza por medio de las siguientes reacciones:



donde:

- NO = monóxido de nitrógeno
- NO₂ = dióxido de nitrógeno
- hν = energía radiante solar
- O = átomo libre de oxígeno
- O₂ = oxígeno
- O₃ = ozono

En ausencia de HC, el NO₂ es disociado mediante fotólisis por la luz del sol para producir NO y un átomo de oxígeno. Este a su vez se combina con el oxígeno molecular (O₂) del aire para producir ozono (O₃), que luego puede reaccionar con NO para generar NO₂, en consecuencia, el proceso comienza de nuevo hasta alcanzar un equilibrio dinámico.

Las concentraciones de ozono y de otros oxidantes fotoquímicos se incrementan cuando los HC y productos secundarios de éstos reaccionan con el NO. Los HC también reaccionan con el oxígeno atómico para generar compuestos oxidantes y radicales libres que interactúan con el NO.

Monitoreo ambiental.

El dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2), los hidrocarburos (HC), el monóxido de carbono (CO) y las partículas suspendidas totales (PST) son los contaminantes que se encuentran presentes en mayor cantidad en la atmósfera de la ZMCM. La concentración de estos contaminantes es captada por estaciones de monitoreo, las cuales han evaluado la calidad del aire desde 1986 a la fecha.

En la ciudad de México se utilizan las unidades indicadas en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Unidades empleadas para el monitoreo de la calidad del aire.

Parámetro	Clave	Unidad	Red
Monóxido de carbono	CO	ppm*	Monitoreo automático
Dióxido de azufre	SO_2	ppm	Monitoreo automático
Dióxido de nitrógeno	NO_2	ppm	Monitoreo automático
Ozono	O_3	ppm	Monitoreo automático
Oxidos de nitrógeno	NO_x	ppm	Monitoreo automático
Acido sulfhídrico	H_2S	ppm	Monitoreo automático
Partículas menores a $10 \mu\text{m}$	PM-10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Monitoreo automático
Partículas suspendidas totales	PST	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Monitoreo automático
Plomo	Pb	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Monitoreo automático
Cobre	Cu	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Monitoreo manual
Hierro	Fe	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Monitoreo manual
Cadmio	Cd	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Monitoreo manual
Níquel	Ni	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Monitoreo manual

* Partes por millón. Se divide el volumen en un millón de partes iguales, cada millonésima parte de este volumen que le corresponde a la sustancia de interés, se considera una parte por millón de la sustancia.

Para señalar la calidad del aire en la ZMCM se estableció el IMECA (Índice metropolitano de la calidad del aire)

Índice metropolitano de la calidad del aire (IMECA).

El índice de la calidad del aire, se define como un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos en la salud, dentro de una región determinada. La función principal del IMECA es mantener informada a la población sobre la calidad del aire en la ciudad de México, así como observar el comportamiento de los distintos contaminantes y comparar la calidad del aire entre zonas que utilicen índices similares.

CAPITULO III. FUENTES DE CONTAMINACION DEL AIRE.

Causas de la contaminación del aire.

Las causas de la contaminación se pueden atribuir al consumo de energía o al uso de combustibles, a la calidad y tipo de los mismos, a la tecnología de combustión de los procesos y al control de las emisiones contaminantes.

Considerando el consumo energético en las diferentes regiones del país llegamos a la conclusión que explica el problema de las emisiones y el deterioro en la calidad del aire que caracteriza a la ZMCM: el consumo energético por unidad de superficie (kJ/km^2) es más de 100 veces mayor que en cualquier otra zona del país; en efecto el consumo de gasolina en el sector transporte representa simultáneamente el mayor gasto relativo de energía y la mayor aportación de contaminantes con respecto al volumen total de óxidos de carbono, óxidos de azufre, hidrocarburos principalmente, así mismo las mayores emisiones de SO_2 , PST y NO_x encuentran su origen en aquellos sectores de actividad cuyos insumos energéticos son el combustóleo, gasóleo, el gas natural y el diesel como: la industria, la generación de electricidad y los servicios.

Calidad de los combustibles.

De acuerdo a su naturaleza y destino, cada combustible presenta especificaciones distintas. El contenido de azufre y el poder calorífico, son variables indicadoras de la calidad de cada tipo de combustible. En muchos procesos de combustión los usuarios optan por un combustible más barato dejando de lado los problemas ambientales, de aquí se puede explicar el uso del combustóleo, un combustible barato, de alto rendimiento energético, pero con altas emisiones de óxidos de azufre; por el contrario el uso de los gases LP y natural, cuya combustión es mucho más benigna para la calidad del aire, presentan problemas de disponibilidad que limitan su consumo.

Se puede mencionar que en cuanto al manejo y a las capacidades de refinación y tratamiento de energéticos, la calidad de los combustibles representa uno de los frentes de acción más importantes para controlar la contaminación atmosférica.

Tecnología de combustión y control de emisiones.

Se sabe que el empleo de equipos de control de emisiones en los establecimientos industriales es limitado, ya que en la mayoría de los casos está orientado al control de polvos y la recuperación de gases o partículas se realiza por conveniencia, es decir, por necesidades de proceso. El control de los gases de combustión en calderas de mediano y gran tamaño no es el adecuado en la mayoría de los casos. Cuando las calderas trabajan con eficiencias de combustión adecuadas, se puede propiciar que las temperaturas dentro de las cámaras de combustión sean muy elevadas, incrementando con esto la generación de óxidos de nitrógeno, para evitar esto último se puede hacer uso de quemadores de bajos NOx para reducir estas emisiones.

Hay que mencionar que los sistemas de combustión instalados en los establecimientos de servicios y comerciales en su mayoría son obsoletos, sin mencionar deterioro, además de que algunas veces son operados en forma ineficiente. Ahora, el control de emisiones en las actividades donde se aplican solventes, constituidos por hidrocarburos con diferentes grados de reactividad fotoquímica, no es de ninguna manera el adecuado y las mismas técnicas de aplicación y otros usos de éstas sustancias propician su desperdicio y consumo excesivo.

El control de emisiones evaporativas no se realiza en almacenamiento o estaciones de servicio de gasolina, como tampoco se realiza en las instalaciones industriales, esto se percibe en los alrededores de ciertas industrias situadas en zonas densamente pobladas que tienen que sufrir la presencia de los vapores nocivos que aunque pueden no ser muy reactivos, representan un riesgo inmediato a la salud.

La eficiencia de combustión juega un papel importante en las emisiones contaminantes, el nivel de eficiencia depende del diseño, del equipo, de su estado y de las condiciones de operación.

Se han efectuado evaluaciones en los establecimientos de servicio que han revelado, en general, que los equipos de combustión operan con muy bajas eficiencias [18], repercutiendo notablemente en las emisiones contaminantes.

El exceso de aire en un proceso de combustión influye significativamente en la generación de NOx y en la eficiencia de combustión; se considera que un exceso de aire de entre 40 y 50 % es razonable, sin embargo, el 61 % de los servicios operan con excesos mayores al 100 % [2].

Transporte.

Todos los vehículos motorizados anteriores a 1991 que no cuentan con convertidores catalíticos tienen una gran aportación en las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos y dióxido de nitrógeno.

Aunque los autos privados tienen un uso extensivo e intensivo, solamente cubren el 18 % de la demanda de viajes-persona-día (no incluyendo los viajes en el sistema de transporte colectivo Metro); mientras que por otro lado los colectivos, con un menor porcentaje del parque vehicular, absorben aproximadamente 68% de éstos viajes [19], lo cual indica que el mayor tránsito vehicular es debido a los autos privados.

Lógicamente al ser mayor el número de automotores, es mayor la aportación de emisiones contaminantes; debemos agregar que el transporte particular ocupa un área vial por persona considerablemente mayor que los demás medios de transporte, lo cual ha llevado a saturar la capacidad de diversas vialidades, repercutiendo en muy bajas velocidades de circulación que a su vez contribuyen a incrementar las emisiones contaminantes a la atmósfera.

Debemos mencionar también que en la ZMCM gran parte de los habitantes tienen que recorrer distancias considerables, invirtiendo una parte importante de su tiempo para transportarse, lo cual implica que realicen mayores emisiones contaminantes al tener que (en el caso de tener auto propio) circular mayor tiempo.

Es importante mencionar que la localización de las industrias influyen sobre las necesidades de transporte, determinando a la vez el impacto de la dispersión de los contaminantes sobre las áreas habitacionales.

En el caso de la ZMCM, las zonas industriales se encuentran localizadas viento arriba por lo que afectan directamente al resto de la mancha urbana. Este hecho que magnifica la exposición de la población a las emisiones contaminantes, deja en claro que la prevención de la contaminación comienza con una adecuada planeación, ubicando a la industria en sitios meteorológicamente apropiados.

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, propiciando con ello tolvaneras y la emisión de partículas en suspensión, principalmente en la época de estiaje. La influencia en la contaminación del aire en la ZMCM puede alcanzar proporciones importantes, si a esto se agrega la inadecuada disposición de residuos sólidos en tiraderos a cielo abierto, la situación obviamente se agrava.

Clasificación de las fuentes de contaminantes.

El origen de la contaminación del aire, como se mencionó anteriormente, es la fuente de emisión de las sustancias contaminantes.

Las fuentes de emisión importantes son los transportes, la producción de energía eléctrica, el consumo de combustibles comerciales y domésticos, la incineración de residuos, tolvaneras y obviamente el consumo de combustibles en los procesos industriales.

Existen fuentes de contaminación atmosférica de tipo antropogénico y de tipo natural; éstas son las tolvaneras, erupciones volcánicas, incendios forestales y emisiones por vegetación. Las de tipo antropogénico son las causadas por el hombre y se pueden clasificar en fuentes fijas y fuentes móviles.

Fuentes fijas.

Son el resultado de la actividad en todos los establecimientos relacionados con la producción industrial, es decir, con la fabricación de todo tipo de bienes manufacturados, así como los que utilizan la combustión para obtener calor, generar electricidad o movimiento, además de otras actividades como la fundición, la producción de cemento y asbesto, refinación de petróleo y producción de sustancias químicas.

A la actividad industrial se le suman las fuentes denominadas menores o de servicios, que son los lugares donde un establecimiento o comercio es dedicado a la prestación o venta de un servicio; como ejemplo de éstas últimas se encuentran los baños públicos, hoteles, centros deportivos, hospitales, lavanderías, tintorerías, restaurantes y panificadoras .

La emisión de contaminantes en los establecimientos de servicios tienen su origen en los procesos de combustión empleados para brindar bienestar a la población (satisfiriendo algunas de sus necesidades) utilizando combustibles tales como gas LP, diesel, gasóleo y gas natural. La amplia distribución de los establecimientos de servicios en áreas completamente urbanizadas permite que las emisiones contaminantes tengan una influencia sobre la población y los materiales. La gran mayoría de éstos establecimientos normalmente operan en condiciones inadecuadas, con altos excesos de aire y, por lo tanto, con bajas eficiencias, lo cual se traduce en consumos elevados de energía, pérdidas económicas y contaminación.

Actualmente, la industria es una actividad que genera más del 30 % del producto interno bruto de la ZMCM y representa más de la tercera parte del valor de la producción manufacturera a nivel nacional, sin embargo, como ya sabemos esto trae consigo severos impactos ambientales.

En nuestro trabajo trataremos las emisiones contaminantes de las fuentes fijas como el resultado del consumo de combustibles registrado en la ZMCM.

Fuentes móviles.

Las fuentes móviles son dispositivos como los aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, tractocamiones, autobuses, camiones, automóviles, motocicletas, embarcaciones, equipo y maquinarias no fijos, con motores de combustión y similares, que con motivo de su operación generan o pueden generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

La información sobre este tipo de fuente incluye: mantenimiento del automóvil y sus dispositivos de control de emisiones. Las emisiones por hidrocarburos y de monóxido de carbono se incrementan como consecuencia de un proceso de combustión deficiente e incompleto ocurrido en los motores. Los óxidos de nitrógeno provienen de la fijación del nitrógeno y del oxígeno utilizados en la combustión, incrementando su emisión por la presencia de altas presiones y temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión de los motores.

Los escapes de hidrocarburos no quemados en los automóviles se realizan a través de evaporaciones en el tanque de combustible y carburador y constituyen aproximadamente un 20 % de la emisión total de un vehículo sin control [1], aunque actualmente la mayoría de los vehículos nuevos cuentan con sistemas de control de emisiones evaporativas. Los primeros análisis de los automóviles sin control de emisiones que muestran las fuentes de emisión se mencionan en la tabla 3.3, [1].

Tabla. 3.3. Emisiones en automóviles sin control (%).

Fuente	CO	HC	NOx	Partículas
Escape	100	62	100	90
Emisión del cárter		20		10
Evaporación en el tanque de combustible		9		
Evaporación por el carburador		9		

El uso creciente del automóvil tiene su efecto correlativo en la contaminación: más del 80% de los automóviles se emplea para usos privados o individuales, transporta el 19 % de los viajes-persona-día (VPD) y consume mucho más combustible por persona que el sistema colectivo. Entre 1970 y 1991 su consumo en la ciudad se incrementó en más del doble y representó un tercio del total nacional.

Está comprobada la relación directa entre la emisión de contaminantes con la velocidad, el flujo y la elevada concentración de vehículos. El intenso tráfico es factor importante en las emisiones de éstas fuentes, en horas pico cuando transita más del 50 % de los vehículos, el gasto de gasolina es mayor y se eleva por consiguiente el nivel de emisiones.

A la enorme cantidad de vehículos se agrega la antigüedad y la falta de mantenimiento de la mayor cantidad de ellos. En promedio los vehículos automotores tienen 10 años de uso y un buen porcentaje circula en malas condiciones.

La emisión de todos los contaminantes atmosféricos provienen en buena medida de unidades en mal estado que generan un consumo excesivo de combustible en la cámara de combustión; técnicamente se trata de relaciones bajas de aire-combustible (A/C). Se estima que el 85 % de los vehículos circulan con mezclas de 13 partes de aire por una de combustible [2], lo cual se considera inadecuado; el 10 % con mezclas más bajas de 11 partes de aire por una de combustible, a esto hay que agregar la falta de tapones (en algunos automóviles) en el tanque de gasolina, así como el llenado hasta el máximo de éstos, el suprimir el termostato, no sustituir periódicamente el filtro de aire y calentar el motor más de 30 segundos y acelerarlo.

Si la combustión de la gasolina fuera completa, lo único que quedaría al final serían agua y bióxido de carbono; pero en la realidad la combustión no es completa, ya que origina contaminantes como monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno y una pequeña cantidad de óxidos de azufre. El monóxido de carbono y los hidrocarburos se originan en la combustión incompleta como tal y los óxidos se deben al azufre que conserva el combustible al ser imperfecta su refinación, al nitrógeno del aire que con altas temperaturas se combinan con el oxígeno.

Los vapores del tanque de combustible y del carburador, dependen de la volatilidad del combustible utilizado, así como de la temperatura ambiente, obviamente mientras más volátil sea el combustible y más alta la temperatura exterior, mayores serán las emisiones evaporativas.

Emisiones evaporativas en el almacenamiento y distribución de las gasolinas.

Como veremos en el capítulo de determinación de emisiones contaminantes, las emisiones evaporativas en el almacenamiento y distribución de las gasolinas son considerables, éstas emisiones tienen sus causas, las cuales determinan el nivel de evaporaciones y con esto el nivel de emisiones contaminantes. Las causas a las cuales se le puede atribuir a la evaporación de gasolinas son las siguientes:

Presión de vapor.

La presión de vapor es una medida de la presión que tiende a vaporizar cualquier líquido volátil, tal como petróleo y sus derivados líquidos. Los movimientos moleculares dentro del líquido son responsables de esta fuerza y está relacionada con la composición del líquido. Las moléculas más pequeñas son más activas, por eso la presión del vapor es mayor. Las altas temperaturas también estimulan el movimiento molecular e incrementan la presión de vapor. En el almacenamiento y distribución la gasolina está frecuentemente en contacto con un espacio de vapor. Las moléculas que se vaporizan tienden a dispersarse completamente en el espacio de vapor. Al mismo tiempo, algunas moléculas en el espacio de vapor regresan al líquido, se establece el equilibrio cuando las moléculas que salen regresan al líquido en la misma proporción.

Presión de vapor verdadera.

La presión de vapor verdadera es la presión de vapor de un líquido a una temperatura específica y sin que su composición sea cambiada por la evaporación. En una mezcla de hidrocarburos la presión de vapor disminuye, debido a que los componentes ligeros se evaporan con más facilidad, dejando a los componentes pesados y menos volátiles en fase líquida.

La presión de vapor verdadera a la temperatura de almacenamiento afecta directamente la cantidad de emisiones contaminantes por evaporación, es decir, incrementando la presión de vapor verdadera se acelera la evaporación dentro del espacio de vapor de cualquier tanque.

Presión de vapor Reid.

La presión de vapor Reid es la presión absoluta en bares determinada a 37.8 °C y la relación de V/L igual a 4, proporción de volumen de vapor a volumen de líquido, como se define por la ASTM (*American Society for Testing Materials*); utilizando un instrumento especial y un proceso estándar bajo los auspicios de la ASTM. Por esto, la PVR es la presión de vapor de una muestra que ha tenido cambios en su composición debido a la evaporación requerida para la saturación de un espacio vapor.

Presión de vapor parcial.

La presión de vapor parcial de la gasolina en su espacio de vapor es una medida de la fuerza ejercida por las moléculas de la misma sobre las paredes del recipiente que la limitan. Las moléculas del aire, presentan usualmente problemas en las emisiones evaporativas, porque generan una presión parcial. La suma de todas las presiones parciales será igual a la presión total del sistema; la presión parcial de cualquier componente del vapor es proporcional a su fracción de volumen del espacio de vapor. Normalmente el espacio de vapor está en contacto con el líquido que emite los vapores de gasolina y el equilibrio se logra cuando la presión parcial de vapor de la gasolina es igual a la presión de vapor del líquido y la relación de evaporación y condensación sea igual.

Los principales tipos de emisiones de vapor de gasolina se pueden clasificar como: emisiones por desplazamiento, por salida del producto, por llenado y por evaporación en condición estática.

Emisiones por desplazamiento.

Las emisiones por desplazamiento ocurren en los tanques de almacenamiento de techo fijo y en los tanques de almacenamiento subterráneos de las estaciones de servicio, debido al desplazamiento de vapor al entrar gasolina al tanque. Estas emisiones de vapor son originadas principalmente por la evaporación del contenido anterior del tanque durante el almacenamiento.

Emisiones por salida del producto.

Las emisiones por salida de producto en un tanque de almacenamiento ocurren cuando se bombea producto hacia afuera, causando entrada de aire por medio de la válvula de alivio. La dilución del vapor de gasolina mezclado con aire, contenido previamente, los llevará a favorecer la evaporación para restaurar el equilibrio. Esto causa un incremento en el volumen aire-vapor y por lo tanto también de presión, que en su momento los llevará a una emisión fuera del tanque cuando el rango de funcionamiento de la válvula de alivio sea excedido.

Emisiones por llenado.

Las emisiones por llenado ocurren cuando la gasolina es transferida de un tanque de almacenamiento a un autotanque (pipa) y cuando se llena el tanque de un automóvil. Las emisiones son usualmente una combinación de vapor que contiene el tanque previamente y el vapor desprendido como resultado del chapoteo y turbulencia durante el llenado.

Emisiones por evaporación (gasolina estática).

Las emisiones por evaporación en el tanque de almacenamiento son ocasionadas por variaciones de temperatura día/noche y por cambios en la presión barométrica, que ocasionan expansión y contracción tanto del líquido como del vapor dentro del tanque. Los factores meteorológicos tales como el viento, sol y lluvia tienden a incrementar las variaciones de temperatura.

CAPITULO IV. DETERMINACION DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES.

Emisiones evaporativas.

Las emisiones de contaminación por evaporación que trataremos en este trabajo son las emisiones de vapores de gasolinas durante el almacenamiento y distribución de éstas.

Emisiones en tanques de almacenamiento de techo fijo.

El cálculo de las emisiones por evaporación de gasolinas se realizará con base en pruebas y ecuaciones desarrolladas en un gran número de tanques de almacenamiento por diferentes industrias y recopilados en el boletín API 2518 (*Evaporation loss from fixed roof tanks*). Los valores calculados por este método pueden parecer lógicos y aplicables al cálculo de emisiones por evaporación en tanques de techo fijo de las instalaciones de almacenamiento de destilados de petróleo, ya que las ecuaciones se derivan de numerosas pruebas en tanques de almacenamiento reales [20], e incluyen parámetros como: espacio en el tanque para permitir la expansión de los vapores del líquido almacenado (espacio de vapor), el diámetro del tanque, la presión de vapor del líquido, la variación de temperaturas, condiciones de pintura exterior, así como la frecuencia con que se llena y se vacía. Las emisiones por evaporación se presentan en dos condiciones: condición estática, cuando el tanque se encuentra en reposo total, es decir, sin movimiento del líquido entrada y/o salida; condición dinámica cuando el tanque se encuentra en operación, es decir, con movimiento de gasolina cuando se esté recibiendo o se esté dando gasolina, o ambos simultáneamente.

Condición estática.

Las emisiones por evaporación en condición estática se definen como el vapor expulsado de un tanque por la expansión térmica de vapores existentes y/o expulsión causada por cambios en la presión barométrica y/o incremento de la cantidad de vapor por la evaporación agregada en la ausencia de cambio en el nivel del líquido, excepto el que resulte de la ebullición.

La ecuación matemática que se utilizará involucra los siguientes datos:

- a).- Propiedades del producto almacenado, tipo de producto, presión de vapor Reid, gravedad y temperatura de almacenamiento.
- b).- Datos sobre el tanque: diámetro, altura, tipo de techo y claro, remachado o soldado, espacio de vapor, color y estado de la pintura.
- c).- Emisiones por evaporación medibles, incluyendo volumen del producto perdido, duración del periodo de prueba y volumen del producto almacenado en el tanque.
- d).- Datos meteorológicos.
- e).- Información sobre accesorios, sistemas de venteo y hermeticidad de todos los accesorios.
- f).- Condiciones de los alrededores como terreno, vegetación y proximidad a grandes extensiones de agua o áreas industriales.

Se hará uso de la ecuación 1 para estimar las emisiones de vapor de gasolina para tanques de techo fijo en condición estática, utilizando su correspondiente factor de ajuste (Kc).

$$E_{ce} = Kc(54.7) \{ P / (101.325 - P) \}^{0.68} (D)^{1.75} (H)^{0.51} (1.8T + 32)^{0.5} (Fp)(C) \quad (1)$$

donde:

E_{ce} = emisiones por evaporación en condición estática (litros/año).

Kc = factor para ajustar pérdidas por evaporación en condición estática de gasolina a pérdidas por evaporación en condición estática de petróleo crudo.

P = presión de vapor verdadera a la temperatura del líquido en kPa, que se obtiene de la fig. 4.1. El promedio de la temperatura del líquido se toma del registro de instrumentos, (si no se dispone de esta información, puede estimarse agregando 2.8 ° C al promedio de la temperatura ambiente del registro meteorológico que se muestra en la tabla 4.1).

D = diámetro del tanque en metros.

H = altura promedio libre para la expansión de los vapores del líquido, en metros, incluyendo una corrección para el volumen del techo (un techo cónico es equivalente en volumen a un cilindro el cual tiene el mismo diámetro en la base como el cono y es 1 a 3 la altura del cono).

T = cambio de temperatura promedio diario en grados C (diferencia entre los registros promedio de temperatura máxima y mínima del registro meteorológico, tabla 4.1).

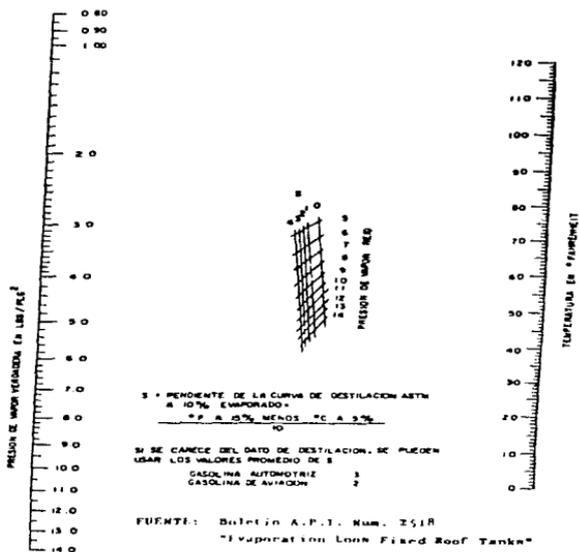


Figura 4.1. Nomograma para determinar la presión de vapor verdadera, teniendo la presión de vapor Reid.

Fp = factor de pintura determinado por pruebas de campo (tabla 4.2).

C = Factor de ajuste para tanques de diámetro pequeño (C=1 para tanques de 10 m de diámetro o mayores).

Tabla 4.1. Registro meteorológico.

MEXICO-CENTRAL-TACUBAYA, D.F.	
Latitud.	19° 24' N
Longitud.	99° 12' W
Altitud (s.n.m.).	2308 m
Temperatura promedio anual (bulbo seco).	15.4 °C
Temperatura promedio anual (bulbo húmedo).	10.6 °C
Temperatura máxima extrema promedio anual.	23.4 °C
Temperatura mínima extrema promedio anual.	9.2 °C
Humedad relativa media anual.	58 %
Humedad relativa máxima.	66 %
Humedad relativa mínima.	44 %

Tabla 4.2. Factor de pintura [20].

Color de la pintura.	Fp (pintura en buenas condiciones).	Fp (pintura en malas condiciones).
Blanco.	1.00	1.15
Aluminio 1.	1.20	1.29
Aluminio 2.	1.39	1.46
Gris claro.	1.33	----
Gris.	1.46	----

Condición dinámica.

Las emisiones por evaporación de gasolinas en condición dinámica se definen como el vapor expulsado en un tanque como el resultado de un líquido bombeado hacia adentro o hacia afuera del tanque, dichas emisiones pueden dividirse en dos categorías:

a).- Emisiones por llenado; emisiones asociadas con vapor desplazado por entrada de líquido.

b).- Emisiones por vaciado; emisiones asociadas con la disminución del nivel del líquido.

La ecuación que se utilizará para determinar las emisiones fue obtenida de numerosas pruebas en tanques de techo fijo en condición dinámica, cuyos datos recolectados son los mismos mencionados anteriormente en condición estática. Se utilizará la siguiente ecuación :

$$E_{ed} = (K)(P)(V)(Kt)(N)1.472 \times 10^{-5} \quad (2)$$

donde:

E_{ed} = emisiones por evaporación en condición dinámica (litros/año)

K = factor de cálculo para emisiones por evaporación en condición dinámica (3.0 para gasolina).

P = presión de vapor verdadera a la temperatura del líquido en kPa, (ver fig.4.1).

V = volumen del líquido bombeado dentro del tanque en litros.

Kt = factor cíclico (para 35 o menos ciclos por año $Kt=1$)

$Kt = (180+N)/6N$ (para más de 36 ciclos por año)

N = número de ciclos por año.

$N = (365 \text{ días por año})/(\text{número de días por ciclo})$.

Llenado de autotanques.

Ocurren emisiones de vapor cuando la gasolina es cargada dentro de los compartimientos de los autotanques (pipas) para transportarla hacia las estaciones de servicio. Las emisiones son una mezcla de vapor de prellenado (V_p) y vapor evolucionado (V_e). El vapor de prellenado es un residuo originado por el contenido previo y que es desplazado por el producto cargado y es definido por un factor de saturación total (C_p). El vapor evolucionado es el vapor emitido desde el volumen del producto que es cargado. Las emisiones en el llenado de autotanques son la suma del vapor emitido debido al desplazamiento y a la evaporación.

Factor total de saturación (Cp).

La concentración de vapor de prellenado en un tanque para el transporte de gasolina puede variar mucho, desde aproximadamente cero hasta saturado. Las concentraciones típicas, expresadas como una fracción o como un porcentaje de saturación, basado en un gran número de observaciones hechas en Europa y E.U. [20] son:

- a).- Tanque del camión después de la descarga completa en un punto.
0.1-0.2 (10-20%)
- b).- Tanque del camión después de la descarga en más de un punto.
0.3-0.5 (30-50%)
- c).- Tanque del camión después de la descarga en una estación de servicio.
0.9-1.0 (90-100%)

El Vb es la fracción del volumen del tanque para ser saturado completamente durante el llenado, representa el chapoteo del líquido generado por el llenado y éste valor debe ser usado para estimar el vapor evolucionado. Algunos valores típicos derivados durante algunas pruebas realizadas en Alemania y otros países de Europa por la *British Petroleum Company* se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Llenado de autotanque por arriba (90-180 m³/hr) [20].

Brazo de salida	Vb (rango)	Vb (promedio)
a) 0.2 m de altura desde el fondo del tanque	0.08-0.22	0.15
b) Igual que a), pero con válvula reguladora	0.07-0.20	0.13
c) 0.38-1.4 m desde el fondo del tanque	0.26-0.54	0.40
d) Llenado por el fondo (90-120 m ³ /hr)	0.09-0.16	0.13

La ecuación 3 puede ser usada para calcular éstas emisiones:

$$E_1 = 45 \times 10^{-4} \cdot Cs \{ Cp + Vb(1-Cp)/(1-0.01Cs) \} \quad (3)$$

donde:

E₁ = emisiones en el llenado, expresado como un porcentaje del volumen del líquido de llenado.

C_s = concentración de vapores de gasolina bajo condiciones de equilibrio (saturado completo). Este es proporcional a la presión de vapor verdadera del producto líquido en kPa.

V_b = representa la cantidad de chapoteo en el llenado.

Llenado de tanques subterráneos en estaciones de servicio.

Las principales emisiones de un tanque subterráneo en una estación de servicio, serán emisiones por desplazamiento a través de tubos de ventilación, esto ocurre cuando un volumen de gasolina entra en el tanque desplazando los vapores emanados del contenido anterior. Estos tanques son de ventilación libre puesto que no cuentan con válvulas de alivio, las emisiones por evaporación en condición estática no se consideran por que son muy pequeñas, esto es debido al hecho de que los tanques siempre están bajo tierra y por lo tanto no son objeto de las variaciones ambientales diarias como ocurre en los tanques que no están bajo tierra.

La ecuación 4 se utilizará para determinar las emisiones en el llenado de tanques subterráneos:

$$E_2 = 0.45 \times 10^{-3} P \quad (4)$$

donde:

E_2 = emisiones en el llenado tanques de almacenamiento subterráneos en estaciones de servicio, expresado como un porcentaje del líquido de llenado.

P = presión de vapor verdadera del producto en kPa (fig. 4.1).

Llenado de tanques de automóviles.

Durante el llenado de los tanques de gasolina de los automóviles se realizan emisiones de vapor por desplazamiento.

En los Estados Unidos de Norteamérica se desarrolló una ecuación para calcular la cantidad de emisiones para condiciones variables. Esta ecuación es la siguiente:

$$E_3 = \exp^{1-3.172 + 0.021Tf - 0.0221Tv + (64.1v - Pr) \cdot 10^{-5} + 0.0114 Pr} \quad (5)$$

donde:

E_3 = emisiones durante el llenado de tanques de automóviles expresado como porcentaje del volumen del líquido suministrado.

Tf = temperatura de la gasolina suministrada ($^{\circ}C$).

Tv = temperatura del vapor desplazado ($^{\circ}C$).

Pr = presión de vapor verdadera (kPa).

Determinación de las emisiones evaporativas de las gasolinas en tanques de almacenamiento y distribución en el valle de México.

Se cuenta con cuatro terminales en el valle de México para la distribución de gasolinas, éstas son:

- Terminal Satélite Oriente.
- Terminal Satélite Sur.
- Terminal Satélite Norte.
- Terminal Azcapotzalco.

Terminal Satélite Oriente

Esta terminal cuenta con cuatro tanques de 8,745,000 litros cada uno.

a).- Emisiones evaporativas promedio por condición estática:

datos:

Producto = gasolinas.

Presión de vapor Reid (PVR) = 65.581 kPa

Diámetro de tanque = 30.48 m

Altura del tanque = 12.2 m

Altura de llenado nominal al 80 % de su capacidad = 9.753 m
 Altura del espacio vapor = 2.44 m
 Altura del techo = 0.915 m
 Color de la pintura exterior = blanca
 Condiciones de la pintura = buena
 Temperatura ambiente mínima = 9.2 °C
 Temperatura ambiente máxima = 23.4 °C
 Temperatura media = $(9.2 + 23.4)/2 = 16.3$ °C
 P = 38.6 kPa (de la fig. 4.1 con la PVR y la Tm más 2.8 °C).
 H = altura del tanque sin llenar + altura promedio del techo cónico
 H = $2.44\text{m} + (0.915\text{m})/3 = 2.745$ m
 T = $24.4 - 9.2$ °C = 14.2 °C
 Fp = 1.0 (de la tabla 4.2)
 C = 1.0 (para tanques de diámetro mayor a 9.14 m)
 Kc = 1.0 para condición estática

Nota: los datos de la temperatura se obtuvieron del banco de datos climatológicos y meteorológicos (ver tabla 4.1).

Sustituyendo los valores en la ecuación 1 se obtiene:

$$E_{ce} = (1)(54.7) \{ 38.6 / (101.325 - 38.6) \}^{0.06} (30.48)^{1.75} (2.743)^{0.51} (14.2 \times 1.8 + 32)^{0.5} (1)(1)$$

$$E_{ce} = 184,600 \text{ litros/año}$$

b).- Emisiones evaporativas promedio para condición dinámica de un tanque de techo fijo de 8,745,000 litros. Datos:

k = 3.0 para gasolinas
 P = 38.6 kPa
 V = 6,996,000 litros (80% de la capacidad)
 Kt = consideramos un ciclo de llenado y vaciado en **dos días promedio**.
 $Kt = (180 + N) / 6N$
 N = número de ciclos por año
 N = $(365 \text{ días/año}) / (2 \text{ días/ciclo})$
 N = 182.5 ciclos/año
 $Kt = (180 + 182.5) / (6 \times 182.5) = 0.331$

Sustituyendo en la ecuación (2) se obtiene:

$$E_{cd} = (3)(38.6)(6,996.000)(0.331)(182.5)(1.472 \times 10^{-5})$$
$$E_{cd} = 720,372 \text{ litros/año}$$

Entonces las emisiones evaporativas totales de cada tanque son:

$$E_{tot} = E_{ce} + E_{cd} = 184,600 + 720,372 = 904,972 \text{ litros/año}$$

Se tienen cuatro tanques de almacenamiento de las mismas características, por lo tanto, las emisiones de los cuatro tanques son:

$$E_{4t} = (4)(904,972) = 3,619,888 \text{ litros/año}$$

Terminal satélite sur.

Esta terminal cuenta con dos tanques de 8,745,000 litros cada uno para el almacenamiento de gasolinas. Como las características de los tanques y las condiciones ambientales se consideran iguales a las de los tanques de la terminal oriente; entonces las emisiones de los dos tanques son:

$$E_{2t} = (2)(904,972) = 1,809,944 \text{ litros/año}$$

Terminal satélite norte.

Esta terminal cuenta para el almacenamiento de gasolinas con dos tanques de 15,900,000 litros cada uno.

a).- Emisiones promedio por evaporación en condición estática:
datos:

Producto = gasolinas.

Presión de vapor Reid (PVR) = 65.581 kPa

Diámetro de tanque = 40.74 m

Altura del tanque = 12.2 m
 Altura de llenado nominal al 80 % de su capacidad = 9.753 m
 Altura del espacio vapor = 2.44 m
 Altura del techo = 0.915 m
 Color de la pintura exterior = blanca
 Condiciones de la pintura = buena
 Temperatura ambiente mínima = 9.2 °C
 Temperatura ambiente máxima = 23.4 °C
 Temperatura media = $(9.2 + 23.4)/2 = 16.3$ °C
 P = 38.6 kPa (de la fig. 4.1 con la PVR y la Tm más 2.8 °C).
 H = altura del tanque sin llenar + altura _{promedio} del techo cónico
 H = 2.44m + (0.915m)/3 = 2.745 m
 T = 24.4 - 9.2 °C = 14.2 °C
 Fp = 1.0 (de la tabla 4.2)
 C = 1.0 (para tanques de diámetro mayor a 9.14 m)
 Kc = 1.0 para condición estática.

Nota: los datos de la temperatura se obtuvieron del banco de datos climatológicos y meteorológicos (ver tabla 4.1).

Sustituyendo los valores en la ecuación 1 se obtiene:

$$E_{cc} = (1.0)(54.7)\{38.6/(101.325-38.6)\}^{0.68}(40.74)^{1.73}(2.74)^{0.51}(14.2 \times 1.8 + 32)^{0.5}(1)(1)$$

$$E_{cc} = 304,077 \text{ litros/año}$$

b).- Emisiones promedio por evaporación en condiciones dinámicas.
datos:

k = 3.0 para gasolinas

P = 38.6 kPa

V = 12,720,000 litros (80 % de su capacidad nominal)

Kt = consideramos un ciclo de llenado y vaciado en cinco días promedio)

Kt = $(180+N) / 6N$

N = $(365 \text{ días/año}) / (5 \text{ días/ciclo})$

N = 73 ciclos/año

Kt = $(180+73) / (6 \times 73) = 0.5776$

Sustituyendo los valores en la ecuación 2 se obtiene:

$$E_{ed} = (3)(38.6)(12,720,000)(0.5776)(73)1.472 \times 10^{-5}$$

$$E_{ed} = 914,226 \text{ litros/año}$$

Entonces las emisiones totales en un tanque de 15,900,000 litros son:

$$E_{tot} = E_{ve} + E_{ed} = 304,077 + 914,226 = 1,218,303 \text{ litros/año}$$

En la terminal satélite norte se tienen dos tanques de 15,900,000 litros y como tienen las mismas características, las emisiones totales son:

$$E_{2t} = (1,218,303)(2) = 2,436,606 \text{ litros/año}$$

Terminal Azcapotzalco.

Esta terminal cuenta con tres tanques de 12,720,000 litros cada uno.

a).- Emisiones promedio por evaporación en condición estática.

datos:

Producto = gasolinas.

Presión de vapor Reid (PVR) = 65.581 kPa

Diámetro de tanque = 36.6 m

Altura del tanque = 12.2 m

Altura de llenado nominal al 80 % de su capacidad = 9.753 m

Altura del espacio vapor = 2.44 m

Altura del techo = 0.915 m

Color de la pintura exterior = blanca

Condiciones de la pintura = buena

Temperatura ambiente mínima = 9.2 °C

Temperatura ambiente máxima = 23.4 °C

Temperatura media = $(9.2 + 23.4)/2 = 16.3$ °C

P = 38.6 kPa (de la fig. 4.1 con la PVR y la Tm más 2.8 °C).

H = altura del tanque sin llenar + altura promedio del techo cónico.

$$\begin{aligned}
 H &= 2.44\text{m} + (0.915\text{m})/3 = 2.745 \text{ m} \\
 T &= 24.4 - 9.2 \text{ }^\circ\text{C} = 14.2 \text{ }^\circ\text{C} \\
 F_p &= 1.0 \text{ (de la tabla 4.2)} \\
 C &= 1.0 \text{ (para tanques de diámetro mayor a 9.14 m)} \\
 K_c &= 1.0 \text{ para condición estática.}
 \end{aligned}$$

Nota: los datos de la temperatura se obtuvieron del banco de datos climatológicos y meteorológicos (ver tabla 4.1).

Sustituyendo los valores en la ecuación 1 se determina:

$$E_{ce} = (1.0)(54.7)\{38.6 / (101.325 - 38.6)\}^{0.68} (36.6)^{1.73} (2.74)^{0.51} (14.2 \times 1.8 + 32)^{0.5} (1)(1)$$

$$E_{ce} = 252,780 \text{ litros/año}$$

b).- Emisiones promedio por evaporación en condiciones dinámicas.

$$\begin{aligned}
 k &= 3.0 \text{ para gasolinas} \\
 P &= 38.6 \text{ kPa (calculada anteriormente)} \\
 V &= 10,176,000 \text{ litros (al 80 \% de su capacidad)} \\
 K_t &= (180 + N) / 6N \\
 N &= 365/3 = 121.67 \text{ ciclos/año} \\
 K_t &= (180 + 121.67) / (6)(121.67) = 0.413
 \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 2 se obtiene:

$$\begin{aligned}
 E_{ed} &= (3)(38.6)(10,176,000)(0.413)(121.67)1.472 \times 10^{-5} \\
 E_{ed} &= 871,620 \text{ litros/año}
 \end{aligned}$$

Las emisiones por tanque son:

$$E_{tm} = 252,780 + 871,620 = 1,124,400 \text{ litros/año}$$

En la terminal Azcapotzalco se tienen tres tanques de 12,720,000 litros con las mismas características, entonces las emisiones promedio totales de los tanques son:

$$E_M = (3)(1,124,400) = 3,373,200 \text{ litros/año}$$

La suma de las emisiones promedio en tanques de almacenamiento dentro de las terminales en el valle de México son :

Terminal	Emisiones (litros/año)
Satélite Oriente	3,619,888
Satélite Sur	1,809,944
Satélite Norte	2,436,606
Azcapotzalco	3,373,200
Total	11,239,638

Estimación de las emisiones evaporativas promedio en el llenado de autotanques.

Estas emisiones se determinarán con base en el porcentaje del volumen promedio manejado de gasolina en el llenado de autotanques, es decir, se obtendrá el porcentaje de gasolina evaporada respecto al volumen promedio manejado de la misma en el llenado de autotanques. Se consideran condiciones de operación y diseño del llenado de autotanques iguales en las cuatro terminales de almacenamiento y distribución; por lo tanto se evaluarán las emisiones evaporativas como anteriormente se explicó.

Se tienen los siguientes datos:

E_1 = emisiones evaporativas en % del volumen manejado

C_s = 38.6 kPa

C_p = 0.2 ó 20% (inciso (a) visto en la sección de emisiones en el llenado de autotanques).

V_b = para este valor consideramos el del inciso (c) de la tabla 4.3. Como se utilizan brazos de llenado de 1.2 m de largo y el tanque de transporte tiene 1.62 m de fondo se tiene que la salida del brazo de llenado queda a 0.42 mts de altura del fondo del tanque.

Interpolando para 0.42 m se determina $V_b = 0.27$

Sustituyendo valores en la ecuación 3 se obtiene:

$$E_1 = (45 \times 10^{-4})(38.6)\{0.2 + 0.27(1-0.2)/(1-0.01(38.6))\}$$

$E_1 = 0.096 \%$ (porcentaje de gasolina evaporada respecto al volumen de gasolina manejada).

Para el cálculo de las emisiones promedio de gasolinas en el llenado de autotanques se va a utilizar el porcentaje de pérdidas que resulta respecto a las ventas promedio anuales por terminal.

Terminal satélite oriente.

Ventas promedio anual = 1,884,930.054 m³/año

Emisiones = (1,884,930.054 × 10³)(0.00096) = 1,809,533 litros/año

Terminal satélite sur.

Ventas promedio anual = 1,170,169.881 m³/año

Emisiones = (1,170,169.881 × 10³)(0.00096) = 1,123,363 litros/año

Terminal satélite norte.

Ventas promedio anual = 756,999.954 m³/año

Emisiones = (756,999,954)(0.00096) = 726,720 litros/año

Terminal Azcapotzalco.

Ventas promedio anual = 2,429,969.970 m³/año

Emisiones = (2,429,969.970 × 10³)(0.00096) = 2,332,771 litros/año

Las emisiones evaporativas de gasolina totales en el llenado de autotanques en la ZMCM.

$$\text{Emisiones}_{\text{tot}} = 5,992,387 \text{ litros/año}$$

Determinación de las emisiones evaporativas de gasolina en el llenado de tanques subterráneos en estaciones de servicio.

Sustituyendo $P = 38.6 \text{ kPa}$ en la ecuación 4 se obtiene:

$$E_2 = (0.45)(10^{-3})(38.6) = 0.174 \% \text{ (porcentaje del volumen manejado)}$$

Las cuatro terminales de almacenamiento y distribución que se consideran en este trabajo surten de gasolina a 361 estaciones de servicio locales (dentro del área metropolitana) y 17 estaciones foráneas. Se consideran sólo las 361 estaciones en la ZMCM, las cuales tienen un consumo promedio anual de 5,616,026.916 $\text{m}^3/\text{año}$. Entonces las emisiones evaporativas promedio de gasolina en tanques subterráneos de las estaciones de servicio en la ZMCM son:

$$\text{Emisiones} = (5,616,026.916 \times 10^3)(0.00174) = 9,771,887 \text{ litros/año}$$

Determinación de las emisiones evaporativas de gasolina en el llenado de tanques de automóviles.

Datos:

T_f = temperatura de la gasolina suministrada, consideramos la temperatura promedio de 17 °C.

T_v = temperatura del vapor desplazado en °C, se considera 95 mayor que la de la gasolina suministrada, es decir 22 °C..

P_r = Presión de vapor verdadera = 65.517 kPa

Sustituyendo los valores en la ecuación 5 se obtiene:

$$E_3 = \exp^{(-3.172 \cdot 0.021(17) + 0.0221(22) - (64)(22)(65.517)/10^5 - 0.0114 \times 65.517)}$$

$$E_3 = 0.20 \%$$

En este caso el volumen manejado es el volumen de ventas promedio pero menos las pérdidas sufridas en el llenado de tanques subterráneos en las estaciones de servicio, entonces se tiene que el volumen manejado es:

$$\text{Vol.} = 5,616,026.916 \times 10^3 - 9,771,887 = 5,606,255.029 \times 10^3 \text{ litros/año}$$

$$\text{Emisiones} = (5,606,255.029 \times 10^3) (0.002) = 11,212,510 \text{ litros/año}$$

Las emisiones totales se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Emisiones evaporativas totales.

Fuente de emisión	Emisiones (litros/año)
Tanques de almacenamiento en las 4 terminales	11,239,638
Llenado de autotanques	5,992,387
Llenado de tanques de estaciones de servicio	9,771,887
Llenado de tanques de automóviles	11,212,510
Total	38,216,422

Emisiones contaminantes por procesos de combustión en fuentes fijas.

La determinación de las emisiones en este tipo de fuente emisora será con base en el consumo de combustibles en la ZMCM y en los factores de emisión de cada tipo de combustible utilizado. Estos factores de emisión representan emisiones no controladas [15] y se muestran en la tabla 4.5:

Tabla 4.5. Factores de emisión [15].

combustible	SO ₂ (kg)	NO _x (kg)	PST (kg)	HC (kg)	CO (kg)
combustóleo (m ³)	76	5.38	5.38	0.091	0.6
gasóleo (m ³)	72	2.4	5.38	0.091	0.6
diesel (m ³)	72	2.4	0.24	0.066	0.6
gas natural (10 ³ m ³)	0.0096	8.8	0.48	0.044	0.64
gas lp (propano) (m ³)	0.00216	2.3	0.06	0.06	0.04
gas lp (butano) (m ³)	0.00198	2.5	0.07	0.07	0.04

Consumo de combustible.

Actualmente en la ciudad de México se consume el equivalente a 43.8 millones de litros/día de combustibles derivados del petróleo y su combustión es la causa de la generación de contaminantes. La contribución de los distintos tipos de combustibles al total del consumo energético en la ZMCM se observa en la figura 4.2.

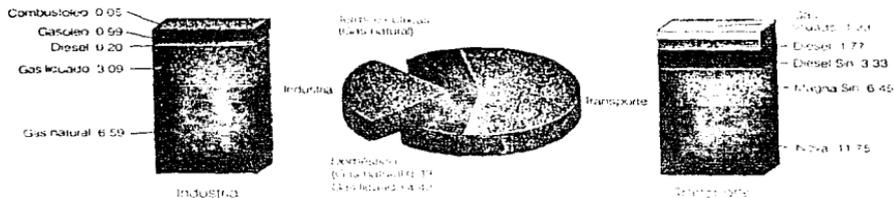


Figura 4.2. Consumo de combustibles por día en la ZMCM [12].
(En miles de metros cúbicos equivalentes a gasolina nova)

Para estimar las emisiones se hará uso también de la tabla 4.6:

Tabla 4.6. Poderes caloríficos de varios combustibles [2].

Combustible	Poder calorífico (kJ/kg)
combustóleo	43,542.7
gasóleo	45,397.5
diesel	44,715.0
gas natural	46,707.4
gas LP	46,054.8
gasolina nova	47,000.6
gasolina magna	47,000.6

Emisiones contaminantes por consumo de combustóleo.

Se consumen diariamente 50 m³ de combustóleo equivalentes a gasolina nova, la densidad del combustóleo es 982 kg/m³ entonces:

$$(50 \text{ m}^3/\text{día})(\rho_{\text{gas nova}})(\rho_{\text{gas nova}}) = (50 \text{ m}^3/\text{día})(47,000.6 \text{ kJ/kg})(726 \text{ kg/m}^3) \\ = 1,706,100 \times 10^3 \text{ kJ/día}$$

$$\text{Consumo}_{\text{de combustóleo}} = (1,706,100 \times 10^3 \text{ kJ/día}) / (PC_{\text{combustóleo}})(\rho_{\text{combustóleo}}) \\ = 39.9 \text{ m}^3/\text{día} \approx 40 \text{ m}^3/\text{día}$$

Emisiones	SO ₂	NO _x	PST	HC	CO
(kg/día)	3040	320	215.2	3.64	24

Emisiones contaminantes por consumo de gasóleo.

Se consumen diariamente 990 m³ de gasóleo equivalentes a gasolina nova, la densidad del gasóleo es 870 kg/m³ entonces:

$$(990 \text{ m}^3/\text{día})(47,000.6 \text{ kJ/kg})(726 \text{ kg/m}^3) = 33,781,21 \times 10^6 \text{ kJ/día}$$

$$\text{Consumo}_{\text{de gasóleo}} = (33,781,21 \times 10^6 \text{ kJ/día}) / (PC_{\text{gasóleo}})(\rho_{\text{gasóleo}}) \\ = 855.31 \text{ m}^3/\text{día} \approx 856 \text{ m}^3/\text{día}$$

Emisiones	SO ₂	NO _x	PST	HC	CO
(kg/día)	61,632	2054.4	4605.3	77.9	513.6

Emisiones contaminantes por consumo de diesel.

Se consumen diariamente 200 m³ de diesel equivalentes a gasolina nova, la densidad del diesel es 852 kg/m³ entonces:

$$(200 \text{ m}^3/\text{día})(47,000.6 \text{ kJ/kg})(726 \text{ kg/m}^3) = 6,824.49 \times 10^6 \text{ kJ/día}$$

$$\text{Consumo}_{\text{de diesel}} = (6,824.49 \times 10^6 \text{ kJ/día}) / (PC_{\text{diesel}})(\rho_{\text{diesel}}) \\ = 179.13 \text{ m}^3/\text{día} \approx 180 \text{ m}^3/\text{día}$$

Emisiones	SO ₂	NO _x	PST	HC	CO
(kg/día)	12,960	432	43	12	108

Emisiones contaminantes por consumo de gas natural.

Se consumen diariamente 6920 m³ de gas natural equivalentes a gasolina nova, la densidad del gas natural es 0,7355 kg/m³ entonces:
 $(6920 \text{ m}^3/\text{día})(47.000,6 \text{ kJ/kg})(726 \text{ kg/m}^3) = 236.127,25 \times 10^6 \text{ kJ/día}$

$$\text{Consumo}_{\text{de gas natural}} = (236.127,25 \times 10^6 \text{ kJ/día}) / (PC_{\text{gas natural}})(\rho_{\text{gas natural}}) \\ = 6.873,491,12 \text{ m}^3/\text{día}$$

Emisiones (kg/día)	SO ₂	NO _x	PST	HC	CO
	66	60,487	3300	303	4400

Emisiones contaminantes por consumo de gas LP.

Se consumen diariamente 7510 m³ de gas LP equivalentes a gasolina nova, la densidad del gas LP es 575 kg/m³ entonces:

$$(7510 \text{ m}^3/\text{día})(47.000,6 \text{ kJ/kg})(726 \text{ kg/m}^3) = 256,259,5 \times 10^6 \text{ kJ/día}$$

$$\text{Consumo}_{\text{de gas LP}} = (256,259,5 \times 10^6 \text{ kJ/día}) / (PC_{\text{gas LP}})(\rho_{\text{gas LP}}) \\ = 9,677 \text{ m}^3/\text{día}$$

Componentes del gas lp	Emisiones (kg/día)				
	SO ₂	NO _x	PST	HC	CO
30% butano	6	7,258	204	204	117
70% propano	15	15,580	407	407	271
Total	21	22,838	611	611	388

Emisiones contaminantes en termoelectricas.

Se consumen diariamente 4060 m³ de gas natural equivalentes a gasolina nova, la densidad del gas natural es 0,7355 kg/m³ entonces:
 $(4060 \text{ m}^3/\text{día})(47.000,6 \text{ kJ/kg})(726 \text{ kg/m}^3) = 138,537,1 \times 10^6 \text{ kJ/día}$

$$\text{Consumo}_{\text{de gas natural}} = (138,537,1 \times 10^6 \text{ kJ/día}) / (PC_{\text{gas natural}})(\rho_{\text{gas natural}}) \\ = 3714 \text{ m}^3/\text{día}$$

Emisiones (kg/día)	SO₂	NO_x	PST	HC	CO
	39	35,488	1,936	178	2,581

En la tabla 4.7 se muestran las emisiones por combustible utilizado en fuentes fijas.

Tabla 4.7. Emisiones totales por procesos de combustión en fuentes fijas.

Combustibles utilizados en industrias y servicios.	SO₂ kg/día	NO_x kg/día	PST kg/día	HC kg/día	CO kg/día
combustóleo	3040	320	215	4	24
gasóleo	61,632	2,055	4,605	78	514
diesel	12,960	432	43	12	108
gas natural	66	60,487	3,300	303	4,400
gas LP	21	22,838	611	611	388
en termoeléctricas					
gas natural	39	35,488	1,936	178	2,581
total	77,755	121,620	10,710	1,186	8,015

Emisiones contaminantes por fuentes móviles.

Para determinar estas emisiones se hará uso de la siguiente información:

Tabla 4.8. Factores de emisión (gr/pasajero·km) [3].

Tipo de vehículo	NO_x	HC	CO
Vehículos privados sin convertidor catalítico.	1.00	4.47	45.2
Vehículos privados con convertidor catalítico.	0.4	0.47	4.70
Taxi sin convertidor catalítico.	1.00	4.47	45.2
Taxi con convertidor catalítico.	0.86	1.00	10.0
Microbús sin convertidor catalítico.	0.2	1.2	9.7
Microbús con convertidor catalítico.	0.16	0.09	0.79
Autobuses urbanos.	0.6	0.2	0.7
Vehículos de carga diesel (gr/km).	10.77	7.71	18.76

Tabla 4.9. Recorrido vehicular en la ciudad de México [5].

Vehículo	km/año-unidad
Autos particulares.	13,000
Taxis	150,000
Camiones de carga diesel.	25,000
Autobuses urbanos.	110,000

Tabla 4.10. Viajes-persona-día en la ZMCM [19].

Tipo de vehículo	viajes-persona-día
colectivos	16,106,994
autos particulares	4,871,561
autobuses urbanos	1,952,229
taxis	743,533

Parque vehicular.

La figura 4.3 muestra la composición del parque vehicular que circula en la ciudad de México. Se observa que más del 70 % corresponde a autos particulares, el 18 % a vehículos de carga y cerca del 8 % a taxis y colectivos.

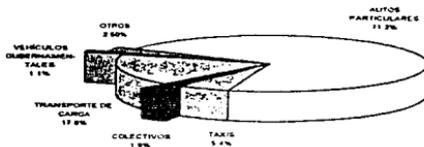


Figura 4.3. Distribución del parque vehicular en la ZMCM [3].

En la figura 4.4 se encuentra el porcentaje de autos particulares modelos 1991 y posteriores del total de autos particulares. Del 100 % de autos particulares 32 % son modelos 1991 y posteriores, por lo tanto el 68 % son modelos anteriores a 1991. Estos porcentajes se utilizarán para determinar las emisiones por autos particulares con y sin convertidor catalítico. Vamos a suponer que los automóviles modelo 1990 y anteriores producen las mismas emisiones (esto debido a la complejidad de determinar los factores de emisión por modelo), la misma consideración tomaremos para los automóviles modelo 1991 y posteriores.

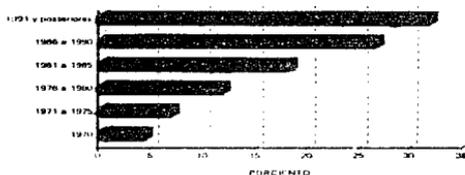


Figura 4.4. Distribución de los vehículos por edades en la ZMCM [3].

Determinación de las emisiones contaminantes por autos particulares.

Emisiones por autos particulares sin convertidor catalítico.

Utilizando la información anterior se tiene:

$$\text{Emisiones} = (f)(v \cdot p \cdot d)(\% \text{ autos s/convertidor cat.})(\text{km recorridos/día})$$

donde:

f = factor de emisión

v·p·d = viajes-persona-día que realizan los autos particulares.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{NO}_x} &= (1.0)(4,871,561)(0.68)(36) \\ &= 119,256 \text{ ton}_{\text{NO}_x}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{HC}} &= (4.4)(4,871,561)(0.68)(36) \\ &= 524.73 \text{ ton}_{\text{HC}}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{CO}} &= (45.2)(4,871,561)(0.68)(36) \\ &= 5390.4 \text{ ton}_{\text{CO}}/\text{día} \end{aligned}$$

Emisiones por autos particulares con convertidor catalítico.

$$\text{Emisiones} = (f)(v \cdot p \cdot d)(\% \text{ autos c/convertidor cat.})(\text{km recorridos/día})$$

donde:

f = factor de emisión

v·p·d = viajes-persona-día que realizan los autos particulares

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{NO}_x} &= (0.4)(4,871,561)(0.32)(36) \\ &= 22.45 \text{ ton}_{\text{NO}_x}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{HC}} &= (0.47)(4,871,561)(0.32)(36) \\ &= 26.38 \text{ ton}_{\text{HC}}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{CO}} &= (4.7)(4,871,561)(0.32)(36) \\ &= 263.8 \text{ ton}_{\text{CO}}/\text{día} \end{aligned}$$

Emisiones contaminantes por taxis.

En este caso como los factores de emisión se encuentran expresados en gr/pasajero·km, al realizar las operaciones el valor que se obtiene de emisiones contaminantes es erróneo, porque el taxi no en todos los kilómetros que recorre lleva pasaje, por lo tanto se tendría que obtener un factor experimental que represente el porcentaje de kilómetros recorridos con pasaje con respecto del total de kilómetros recorridos. En este trabajo se considera que el 40 % de los kilómetros se recorren con pasaje y el 60 % restante sin pasaje. El pasaje lo consideramos como un pasajero.

Se tiene entonces que conocer el número de taxis en la ZMCM. Se sabe que el 5.4 % del parque vehicular en la ciudad de México son taxis y se estima que actualmente circulan 2.7 millones de automotores, entonces el número de taxis es de 145,800 unidades, de éstas se estima que el 60 % cuenta con convertidor catalítico, además no todas las unidades están en circulación diariamente ya que aproximadamente el 20 % descansa; entonces el número de taxis que circula diariamente es de 116,640 unidades. Con las consideraciones anteriores se obtiene lo siguiente:

$$\text{Emisiones}_{\text{por taxis}} = \text{Emisiones}_{\text{con pasaje}} + \text{Emisiones}_{\text{sin pasaje}}$$

$$\text{Emisiones}_{\text{con pasaje}} = (f)(Np)(k)(Nu)(\% k)$$

$$\text{Emisiones}_{\text{sin pasaje}} = (f)(Np)(k)(Nu)(\% k)$$

donde:

f = factor de emisión.

Np = número de pasajeros.

Np = 2 (con pasaje)

Np = 1 (sin pasaje)

k = kilómetros recorridos/unidad

Nu = número de unidades.

% k = porcentaje de kilómetros recorridos.

% k = 0.2 (con pasaje)

% k = 0.8 (sin pasaje)

El número de taxis con convertidor catalítico es de $(0.6)(116640) = 69,984$.

El número de taxis sin convertidor catalítico es de $(0.4)(116640) = 46,656$.

Emisiones por taxis sin convertidor catalítico.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{de NOx}} &= (1.0)(2)(411)(46,656)(0.4) + (1.0)(1)(411)(46,656)(0.6) \\ &= 26.84 \text{ ton}_{\text{NOx}}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{de HC}} &= (4.47)(2)(411)(46,656)(0.4) + (4.47)(1)(411)(46,656)(0.6) \\ &= 120 \text{ ton}_{\text{HC}}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{de CO}} &= (45.2)(2)(411)(46,656)(0.4) + (45.2)(1)(411)(46,656)(0.6) \\ &= 1213.43 \text{ ton}_{\text{CO}}/\text{día} \end{aligned}$$

Emisiones por taxis con convertidor catalítico.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{de NOx}} &= (0.86)(2)(411)(69984)(0.4) + (0.86)(1)(411)(69984)(0.6) \\ &= 34.63 \text{ ton}_{\text{NOx}}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{de HC}} &= (1.0)(2)(411)(69984)(0.4) + (1.0)(1)(411)(69984)(0.6) \\ &= 40.27 \text{ ton}_{\text{HC}}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{de CO}} &= (10)(2)(411)(69984)(0.4) + (10)(1)(411)(69984)(0.6) \\ &= 402.7 \text{ ton}_{\text{CO}}/\text{día} \end{aligned}$$

Emisiones contaminantes por colectivos.

Para la estimación de estas emisiones se tomará la consideración de que cada colectivo transporta en promedio 15 pasajeros durante todos los kilómetros recorridos, estos kilómetros recorridos se obtienen sabiendo que en promedio los colectivos circulan 12 horas al día y la velocidad promedio en la ZMCM es de 36 km/hr; por lo tanto los kilómetros que recorre cada colectivo son 432 km/día.

El número de colectivos en el parque vehicular es del 1.9 %; por lo tanto el número de unidades es de 51,300 y se estima que el 50 % de éstos cuenta con convertidor catalítico.

Emisiones por colectivos sin convertidor catalítico.

$$\text{Emisiones} = (f)(N_p)(k)(N_u)$$

donde:

- f = factor de emisión.
- N_p = número de pasajeros.
- k = kilómetros recorridos por unidad.
- N_u = número de unidades.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{NOx}} &= (0.2)(15)(432)(51,300/2) \\ &= 33.24 \text{ ton}_{\text{NOx}}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{HC}} &= (1.2)(15)(432)(51,300/2) \\ &= 199.45 \text{ ton}_{\text{HC}}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{CO}} &= (9.7)(15)(432)(51,300/2) \\ &= 1612.25 \text{ ton}_{\text{CO}}/\text{día} \end{aligned}$$

Emisiones por colectivos con convertidor catalítico.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{NOx}} &= (0.16)(15)(432)(51,300/2) \\ &= 26.6 \text{ ton}_{\text{NOx}}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{HC}} &= (0.09)(15)(432)(51,300/2) \\ &= 14.96 \text{ ton}_{\text{HC}}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{CO}} &= (0.79)(15)(432)(51,300/2) \\ &= 131.31 \text{ ton}_{\text{CO}}/\text{día} \end{aligned}$$

Emisiones por transporte de carga diesel.

Se sabe que el número de camiones de carga diesel es de 100,000 unidades, el recorrido de los camiones de carga en promedio es de 25,000 km/año-unidad = 68.5 km/día-unidad y los factores de emisión se encuentran expresados en g/km, entonces las emisiones se calculan así:

$$\text{Emisiones} = (\text{factor de emisión})(\text{km recorridos/unidad})(\text{No. unidades})$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{NOx}} &= (10.77)(68.5)(100,000) \\ &= 73.8 \text{ ton}_{\text{NOx}}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{HC}} &= (7.71)(68.5)(100,000) \\ &= 52.8 \text{ ton}_{\text{HC}}/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Emisiones}_{\text{CO}} &= (18.76)(68.5)(100,000) \\ &= 128.5 \text{ ton}_{\text{CO}}/\text{día}\end{aligned}$$

Emisiones por autobuses urbanos.

El número de unidades de autobuses urbanos es de el 1.0 % del total del parque vehicular, es decir 27,000 unidades. El recorrido promedio de un autobús urbano es de 300 km, aquí se tomará un promedio de pasajeros de 40 por cada autobús, entonces las emisiones son:

$$\text{Emisiones} = (\text{factor de emisión})(\text{No. pasajeros})(\text{km /unidad})(\text{No. unidades})$$

$$\begin{aligned}\text{Emisiones}_{\text{NO}_x} &= (0.6)(40)(300)(27,000) \\ &= 194.4 \text{ ton}_{\text{NO}_x}/\text{día}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Emisiones}_{\text{HC}} &= (0.2)(40)(300)(27,000) \\ &= 64.8 \text{ ton}_{\text{HC}}/\text{día}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Emisiones}_{\text{CO}} &= (0.7)(40)(300)(27,000) \\ &= 226.8 \text{ ton}_{\text{CO}}/\text{día}\end{aligned}$$

Emisiones de SO₂ por fuentes móviles.

Para la estimación de estas emisiones se hará el supuesto de que todo el azufre contenido en la gasolina y en el diesel se convierte en SO₂. Para lograr esto primero se obtendrá la cantidad de gasolina y diesel en kg que se consume en la ZMCM, y conociendo los porcentajes de azufre obtenemos la cantidad de éste. Las cantidades de gasolina y diesel consumidas por el transporte se obtienen de la figura 4.2.

Azufre por consumo de gasolina nova.

Se consumen diariamente 11750 m³ de gasolina nova, entonces:

$$\begin{aligned}(11750 \text{ m}^3/\text{día})(\rho_{\text{gasolina nova}}) \\ (11750 \text{ m}^3/\text{día})(726 \text{ kg/m}^3) = 8,530,500 \text{ kg}/\text{día}\end{aligned}$$

El porcentaje en peso de azufre en la gasolina nova es de 0.15 % [21], entonces la cantidad de azufre (S) que reacciona con O_2 para convertirse en SO_2 es:

$$(8,530,500 \text{ kg/día})(0.0015) = 12,795.8 \text{ kg S/día}$$

Azufre por consumo de gasolina magna.

Se consumen diariamente 6450 m^3 de gasolina magna, entonces:

$$(6450 \text{ m}^3/\text{día})(\rho_{\text{gasolina magna}})$$

$$(6450 \text{ m}^3/\text{día})(726 \text{ kg/m}^3) = 4,682,700 \text{ kg/día}$$

El porcentaje en peso de azufre en la gasolina magna es de 0.10 % [21], entonces la cantidad de azufre (S) que reacciona con O_2 para convertirse en SO_2 es:

$$(4,682,700 \text{ kg/día})(0.0010) = 4,682.7 \text{ kg S/día}$$

Azufre por consumo de diesel.

Se consumen diariamente 1770 m^3 de diesel equivalentes a gasolina nova, entonces:

$$(1770 \text{ m}^3/\text{día})(34,116 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3) = 60,385,320 \times 10^3 \text{ kJ/día}$$

$$\text{Consumo}_{\text{de diesel}} = (60,385,320 \times 10^3 \text{ kJ/día}) / PC_{\text{diesel}}$$

$$= (60,385,320 \times 10^3 \text{ kJ/día}) / 38,097 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$$

$$= 1585.041 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$(1585.041 \text{ m}^3/\text{día})(\rho_{\text{diesel}})$$

$$(1585.041 \text{ m}^3/\text{día})(865 \text{ kg/m}^3) = 1,371,060.8 \text{ kg/día}$$

El porcentaje en peso de azufre en el diesel es de 0.5 % [21], entonces la cantidad de azufre (S) que reacciona con O_2 para convertirse en SO_2 es:

$$(1,371,060.8 \text{ kg/día})(0.005) = 6,855.3 \text{ kg S/día}$$

Azufre por consumo de diesel sin.

Se consumen diariamente 3330 m^3 de diesel sin equivalentes a gasolina nova, entonces:

$$(3330 \text{ m}^3/\text{día})(34,116 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3) = 113,606,280 \times 10^3 \text{ kJ/día}$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo de diesel sin} &= (113,606,280 \times 10^3 \text{ kJ/día}) / \text{PC}_{\text{diesel sin}} \\ &= (113,606,280 \times 10^3 \text{ kJ/día}) / 38,097 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3 \\ &= 2982.02 \text{ m}^3/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &(2982.02 \text{ m}^3/\text{día})(\rho_{\text{diesel sin}}) \\ &(2982.02 \text{ m}^3/\text{día})(824 \text{ kg/m}^3) = 2,457,190.2 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

El porcentaje en peso de azufre en el diesel sin es de 0.05 % [21], entonces la cantidad de azufre (S) que reacciona con O_2 para convertirse en SO_2 es:

$$(2,457,190.2 \text{ kg/día})(0.0005) = 1228.6 \text{ kg S/día}$$

Entonces se tiene que el azufre total que reacciona es:

$$12,795.8 + 4,682.7 + 6,855.3 + 1,228.6 = 25,562.4 \text{ kg S/día}$$

Emisiones de SO_2 .

Para obtener las emisiones de SO_2 se utilizará la siguiente reacción:



$$1 \text{ mol de S} + 1 \text{ mol de O}_2 = 1 \text{ mol SO}_2$$

$$\begin{aligned} \text{Peso molecular S} &= 32 \text{ g/mol} \\ \text{SO}_2 &= 32 + 32 = 64 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

Entonces por cada kilogramo de S que reacciona con O_2 se producirá 2 kg de SO_2 , por lo tanto, las emisiones totales de SO_2 por fuentes móviles son:

$$(25,562.4 \text{ kg S/día})(2) = 51,124.8 \text{ kg SO}_2/\text{día}$$

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

Emisiones evaporativas en fuentes móviles.

Una vez determinados los hidrocarburos emitidos en el escape por las fuentes móviles, se debe calcular los emitidos por evaporación en el tanque de combustible y en el motor. Un estudio comparativo de emisiones evaporativas con 20 vehículos [13] muestra resultados en donde la relación promedio entre emisiones evaporativas con respecto a las emisiones del escape es de 0.47; por lo tanto para obtener la cantidad de emisiones evaporativas en los automóviles se multiplicarán las emisiones en el escape que ya se obtuvieron por este valor. Las emisiones totales en la tabla 4.11 ya incluyen las emisiones evaporativas.

Tabla 4.11. Emisiones totales por fuentes móviles ton/día.

Tipo de fuente	SO ₂	NO _x	HC	CO
autos particulares		141.7	810.13	5654.2
taxis		61.47	235.6	1616.1
colectivos		59.84	315.18	1,743.6
camiones de carga diesel		73.8	189	128.5
autobuses urbanos		194.4	64.8	226.8
total	51.13	531.21	1614.7	9369.2

En la tabla 4.11 se encuentran las emisiones totales por fuentes móviles y la tabla 4.12 representa el inventario de emisiones obtenido. La tabla 4.13 nos muestra la aportación de emisiones en porcentaje por sector.

Tabla 4.12. Inventario de emisiones (ton/día).

Fuentes emisoras	SO ₂	PST	NO _x	HC	CO
Transporte	51.13		531.2	1615	9369.2
Industrias y servicios	78	10.7	121.6	1.2	8
Almacenamiento y distribución de gasolina				76.4	
Mercadeo y distribución de gas LP [3]				663.76	
Consumo de solventes, lavado y desengrase [3]				194.65	
Fuentes naturales (suelos)[16]		1.165			
Fuentes naturales (vegetación)[14]				106.6	
Total	129.13	1,175.7	652.8	2657.6	9377.2

Tabla 4.13. Porcentaje en peso por contaminante.

Fuentes emisoras	SO₂	PST	NO_x	HC	CO
Transporte	40		80	61	99.9
Industrias y servicios	60	1	20	0.05	0.1
Almacenamiento y distribución de gasolina				2.8	
Mercadeo y distribución de gas L.P [3]				24.8	
Consumo de solventes, lavado y desengrase [3]				7.25	
Fuentes naturales (suelos)[16]		99			
Fuentes naturales (vegetación)[14]				4.1	
Total	100	100	100	100	100

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.

La tabla 5.1 compara las emisiones obtenidas en el presente trabajo con las obtenidas por dependencias oficiales.

Tabla 5.1. Comparación de los inventarios de emisiones (ton/año).

Contaminante	1989 [2]	1994 [3]	Trabajo actual
SO ₂	205,725	45,468	47,085
CO	2,950,627	2,358,141	3,422,605
NOx	177,339	128,646	238,272
HC	572,101	1,025,759	970,024
PST	450,599	451,614	429,021

Discusión de resultados.

Dióxido de azufre (SO₂)

En las emisiones de SO₂, existe una gran diferencia entre las estimaciones de 1989 (205,725 ton/año) y las de este trabajo (47,085 ton/año), esta diferencia se atribuye a que en 1989 todavía se hacía gran uso de combustóleo y de carbón, tanto para la generación de energía eléctrica como para la industria y servicios, principales fuentes de SO₂ en ese entonces. Además la reducción del contenido de azufre en el diesel ayudó a la disminución de este contaminante.

La diferencia entre los resultados de este trabajo (47,085 ton/año) y los obtenidos en 1994 (45,468 ton/año) es menor, y se puede atribuir a que consideramos emisiones sin control a la atmósfera por industrias y establecimientos de servicios, es decir emisiones sin métodos de remoción de azufre; hay que mencionar que las emisiones por industria en el inventario de 1994 se obtuvieron con base en la suma de las emisiones que cada industria reportó en la encuesta, y obviamente las industrias reportaron emisiones controladas.

Monóxido de carbono (CO)

En las emisiones de CO se nota que en los tres inventarios más del 90 % de las emisiones totales se atribuyen al transporte, es decir las emisiones de CO son dictadas por el uso de automotores. Comparando las emisiones se aprecia que los resultados de este trabajo (3,422,605 ton/año) están muy por encima de las estimaciones de 1994 (2,358,141 ton/año); esta gran diferencia la podemos atribuir a que nosotros consideramos datos de kilómetros recorridos por transporte no muy actuales, los cuales probablemente son mayores a los que se utilizaron en el inventario oficial de 1994.

Hidrocarburos (HC)

Las emisiones totales de HC estimadas en 1989 (572,101 ton/año) se duplicaron con relación a las estimadas en 1994 (1,025,759 ton/año); esta diferencia entre emisiones refleja el aumento de los automotores de 1989 a 1994, ya que en 1989 se estimaron 141,059 ton/año para autos particulares y en 1994 se estimaron 253,865 ton/año, es decir las emisiones aumentaron en 80%, pero también gran parte de la diferencia se debe a que en el inventario de 1989 no se tomaron en cuenta aspectos como el empleo de solventes al aire libre, fugas de gas LP, emisiones de industrias químicas, etc..

Comparando los resultados obtenidos en el trabajo actual (970,024 ton/año) con los estimados en 1994 (1,025,759 ton/año) se nota que éstas son mayores, la diferencia se atribuye a que el trabajo de 1994 tomó en cuenta las emisiones de hidrocarburos en procesos de fabricación, así como en la refinación del petróleo, industria química, industria de minerales, productos de impresión y uso de asfalto, datos que obtuvieron de los reportes de emisiones contaminantes que las industrias entregaron.

Oxidos de nitrógeno (NOx)

Comparando los presentes resultados (238,272 ton/año); con los estimados en 1989 (177,339 ton/año) y en 1994 (128,646 ton/año); podemos atribuir esta gran diferencia a la misma razón que en el caso de las emisiones de monóxido de carbono, es decir, a los datos de los kilómetros recorridos por categoría de transporte que consideramos en el trabajo, los cuales no son muy actuales como mencionamos anteriormente.

Partículas suspendidas totales (PST)

En todos los inventarios las emisiones totales de partículas suspendidas dependen en casi el 95 % de las emisiones por fuentes naturales, es decir la erosión de suelos, y como en todos los inventarios se utilizaron los datos de un estudio de la UNAM [16] entonces las emisiones totales fueron muy semejantes. Lo importante es mencionar que las emisiones de PST en fuentes fijas (que representan solamente alrededor del 3 % de las emisiones totales) disminuyeron de 17,000 ton/año de 1989 a 7,425 ton/año en 1994, esta reducción se atribuye a la sustitución del combustóleo y carbón por el empleo de gas natural en la generación eléctrica y establecimientos de servicios.

Comparando las emisiones por fuentes fijas de 1994 (7,425 ton/año) con las del trabajo actual (3,794 ton/año) se puede explicar que la diferencia se debe a que en este trabajo se consideraron solamente emisiones de PST por procesos de combustión y no se consideraron emisiones por procesos de molido, trituración, etc., en las industrias; aspecto que el inventario de 1994 consideró utilizando los reportes de emisiones que las industrias entregaron.

Aunque la contribución de partículas por industrias es insignificante comparada con el total, hay que resaltar que pueden imponer riesgos dada su toxicidad y el grado de exposición a la población.

Recomendaciones generales.

Como se determinó en el capítulo IV, los medios de transporte son la causa principal de la contaminación del aire en la ZMCM; entonces la instalación de convertidores catalíticos puede ser de gran ayuda.

A partir de los modelos 1991 es obligatoria la instalación de convertidores catalíticos en los vehículos nuevos, pero el alto costo de éstos y de los seminuevos hace que la renovación de los automóviles sea muy lenta, tomando en cuenta el poder adquisitivo de la mayoría de la población. Se puede estimular la conversión de automóviles modelos 1986 a 1990 agregando el convertidor catalítico. Los vehículos de estos modelos tienen los elementos necesarios para poder aprovechar adecuadamente el convertidor

catalítico, incluso no debe pasarse por alto la opción de cambio de motor; como sea, el estímulo será mayor si los equipos en cuestión se ofrecen a un precio accesible, así como la instalación y mantenimiento de los mismos; esto se lograría con el financiamiento del gobierno, el cual podría dar facilidades para el pago de los equipos.

El empleo de gas licuado en el transporte empieza a incrementarse, teniendo lógicamente una menor emisión de contaminantes, entonces se debe dirigir la atención a los métodos de prevención y corrección de posibles fugas, aspecto que ha provocado problemas en los transportes que utilizan este combustible.

Se puede encontrar la forma de tener un mayor uso de trolebuses en los ejes viales, esto se lograría aumentando la velocidad de los mismos y reduciendo fallas, superando sus actuales limitaciones técnicas, ampliando y modernizando el sistema de trolebuses. Por otro lado si se pone en funcionamiento autobuses con bajos niveles de emisiones contaminantes se contaría con un sistema de transporte colectivo eficiente y limpio y por lo mismo se tendría un mayor uso de éste, ya que muchos automovilistas lo utilizarían ahorrándose gasto en gasolina, dejando sus automóviles sin circular y por tanto sin contaminar.

Se debe mirar la opción de utilizar vehículos eléctricos, no refiriéndonos a los trolebuses, sino a vehículos que tendrían autonomía para circular en cualquier calle o camino; la tecnología ha avanzado muy rápido bajo la presión de nuevas legislaciones. Algunos prototipos de coche eléctrico igualan a los de gasolina en aceleración y capacidad de carga, obviamente su costo es más elevado, pero si el avance tecnológico sigue tan rápido como en los últimos años, en poco tiempo podrá haber vehículos eléctricos competitivos.

Un proyecto interesante es el de una carretera electrificada en California, los cables no se ven porque están empotrados en el pavimento de la carretera y además están dotados de núcleos de metal magnetizable, la electricidad que circula por los cables magnetiza el metal. Los automóviles que vayan a tomar energía de la carretera tienen adaptado un elemento magnético plano cerca de la superficie de la carretera, y con él se convierte nuevamente la energía en electricidad, que mueve al vehículo y carga sus baterías.

Se debe realizar una evaluación en las vías primarias de comunicación, con el objeto de agilizar los flujos vehiculares y reducir los congestionamientos de tránsito y con ello las emisiones contaminantes.

El metro es la alternativa de transporte menos contaminante en la ZMCM, por lo que se continúa expandiendo hacia las zonas más pobladas del área metropolitana, rebasando los límites del D. F. Para llegar a los municipios conurbados del estado de México. Se está realizando la construcción de la línea 10 del metro que irá de la colonia Guerrero, en el centro de la ciudad, al municipio de Ecatepec en el estado de México, su operación permitirá sustituir a miles de autobuses, microbuses y autos particulares, con lo cual se estima una considerable disminución de emisiones contaminantes en la zona metropolitana.

Se debe dirigir la atención hacia una aplicación más efectiva de las normas ambientales a las industrias, especialmente en las ramas que estén identificadas como responsables de la mayoría de las emisiones provenientes de fuentes fijas. Esas normas deben ser gradualmente más exigentes, de manera anunciada y oficial, de modo que se pueda programar la respuesta por parte de las empresas respectivas.

Como último comentario, en nuestra ciudad casi todo el bienestar social está fundamentado en el consumo de combustibles, que al quemarse generan contaminación atmosférica. Desde que se enciende la luz en la mañana, al calentar el agua para bañarnos, al calentar los alimentos y al transportarnos a nuestros trabajos se están quemando combustibles, consecuentemente debemos educarnos para que todos ahorremos combustibles, energía y promover la protección del medio ambiente. Hay que incorporar una nueva cultura ambiental en los programas educativos, crear programas de participación ciudadana, así como materiales didácticos que ofrezcan información al respecto. Todos tenemos una responsabilidad ambiental que cumplir.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Kenneth Wark, Cecil Warner; "Contaminación del Aire, Origen y Control", Editorial Limusa, México, 1990.
- 2.- Quadri Gabriel, Sánchez Luis; " La Ciudad de México y la Contaminación Atmosférica", Editorial Limusa, México, 1994.
- 3.- Instituto Nacional de Ecología-D.D.F., "Programa para mejorar la calidad del aire en el valle de México, 1995-2000", Semarnap, México, 1995.
- 4.- INEGI, "Estadísticas del medio ambiente", INEGI, México, 1995.
- 5.- Bravo A. Humberto, "La contaminación del aire en México", Universo siglo veintiuno, México, 1987.
- 6.- Ivan Restrepo, "La contaminación atmosférica en México", Comisión Nacional de Derechos Humanos, México, 1992.
- 7.- D.D.F., "Programa integral de lucha contra la contaminación atmosférica en la ZMCM", Comisión metropolitana para la prevención y control de la contaminación en el valle de México (CMPPCCVM), México, 1990.
- 8.- D.D.F., "Programa integral contra la contaminación atmosférica en la ZMCM, avances junio de 1994", CMPPCCVM, México, 1994.
- 9.- D.D.F., "Programa para el control de la contaminación atmosférica por la industria en la ZMCM", CMPPCCVM, México, 1992.
- 10.- D.D.F., "La contaminación atmosférica en el valle de México, acciones para su control 1988-1994", CMPPCCVM, México, 1995.
- 11.- D.D.F., "Acciones metropolitanas ante contingencias ambientales", CMPPCCVM, México, 1995.

- 12.- D.D.F.-I.N.E., "Informe sobre la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al medio ambiente 1992-1994", CMPPCCVM, México, 1995.
- 13.- D.D.F.-I.M.P., "Estudio para la determinación de emisiones evaporativas en vehículos automotores representativos de la ZMCM", Depto de publicaciones del IMP, México, 1994.
- 14.- Ruíz Suárez Gerardo L., "Reporte final de cálculos y mediciones de hidrocarburos naturales en el valle de México", U.N.A.M., Centro de ciencias de la atmósfera, México, 1994.
- 15.- Environmental Protection Agency, "Factores de emisión para procesos de combustión del AP-42", EPA, U.S.A., 1995.
- 16.- Centro de ciencias de la atmósfera, "Manual de inventario de emisiones contaminantes, emisión de partículas generadas por fuentes naturales", U.N.A.M., México, 1990.
- 17.- Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), "Estudio de llenado de autotanques por la parte de arriba y por la parte de abajo", IMP, México, 1988.
- 18.- D.D.F. Dirección de planeación ecológica, "Contaminación atmosférica provocada por establecimientos de servicios en el D.F." CMPPCCVM, México, 1989.
- 19.- INEGI, "Encuesta origen-destino de los residentes de la ZMCM" INEGI, México, 1994.
- 20.- Boletín 2518 del Instituto Americano del Petróleo (API), "Evaporation loss from fixed roof tanks", Instituto Americano del Petróleo, U.S.A., 1962.
- 21.- PEMEX, "Especificaciones de productos petrolíferos", México 1996.