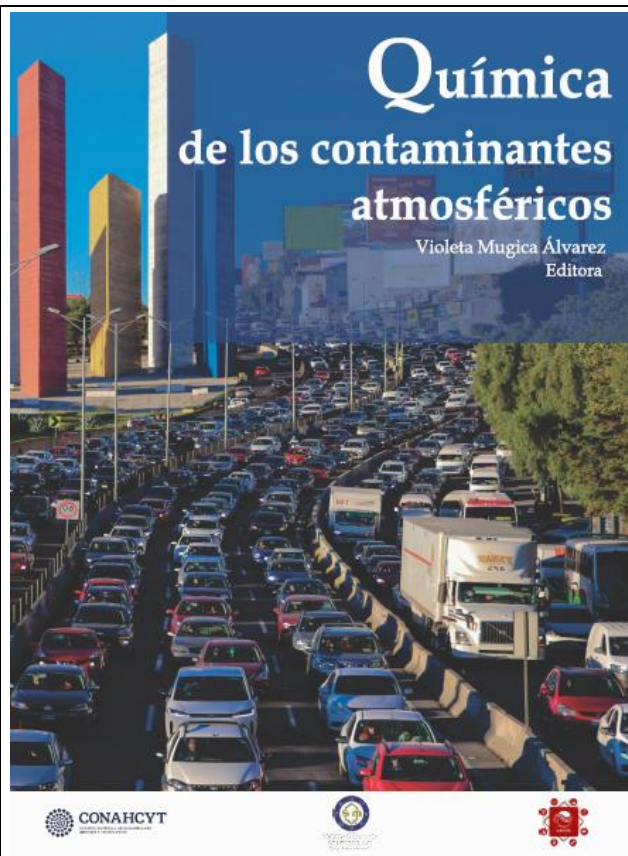




Miguel Torres-Rodríguez

ORCID iD: [0000-0002-1635-8520](https://orcid.org/0000-0002-1635-8520)

Mirella Gutiérrez Arzaluz

ORCID iD: [0000-0002-4699-1087](https://orcid.org/0000-0002-4699-1087)

Capítulo 9

Control químico de contaminantes de fuentes móviles

Páginas 203-221

En:

Química de los contaminantes atmosféricos. Libro número 1 / Violeta Múgica Álvarez, editora. Ciudad de México: Sociedad Química de México, 2023.

ISBN: 978-607-69750-1-5

Universidad
Autónoma
Metropolitana 
Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco
<https://www.azc.uam.mx/>



SOCIEDAD QUÍMICA
DE MÉXICO, A.C.
"La química nos une"



Temas Contemporáneos de Química



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como
Atribución-NoComercial-SinDerivadas

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

CAPÍTULO 9

CONTROL QUÍMICO DE CONTAMINANTES DE FUENTES MÓVILES

Miguel Torres Rodríguez

Departamento de Ciencias Básicas.
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

Mirella Gutiérrez Arsaluz

Departamento de Ciencias Básicas.
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco



9.1 Introducción

La presencia de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles ha sido un problema medioambiental que lejos de resolverse se ha acrecentado debido al continuo uso de vehículos motorizados, aviones, locomotoras y otros motores y equipos que pueden trasladarse de un lugar a otro.

Las fuentes móviles que generan contaminación del aire de acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental (EPA) se clasifican en dos tipos: vehículos y motores en carretera (vehículos ligeros, vehículos pesados y motocicletas) y vehículos y motores fuera de carretera (aeronaves, equipos diésel fuera de carretera, motores marinos, embarcaciones oceánicas, locomotoras, equipos de jardinería y césped, vehículos recreativos) (Figura 9.1).

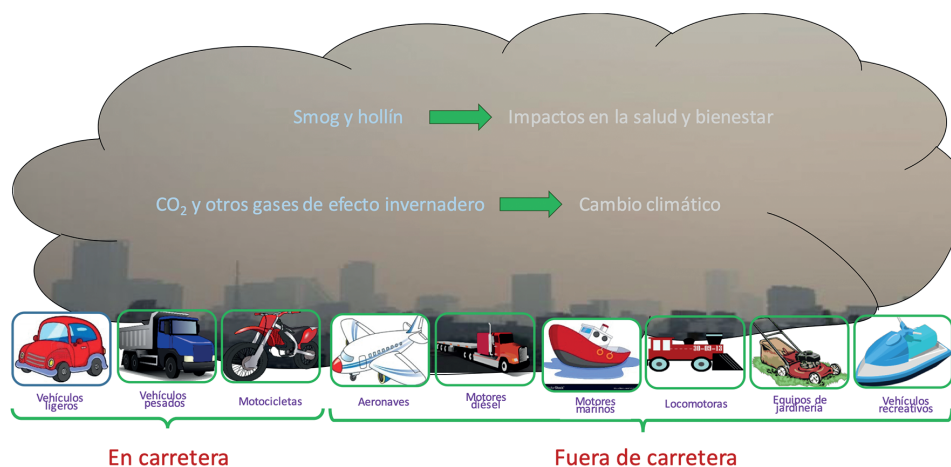


Figura 9.1 Clasificación de las fuentes móviles (adaptado de EPA, 2022).

Pero son los vehículos y motores en carretera los que más preocupan debido a que la mayoría están equipados con motores de gasolina que generan contaminantes, como por ejemplo: óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), hollín e hidrocarburos no quemados (Ferguson *et al.*, 2015). En particular, en los países en desarrollo la mayoría de los vehículos ligeros que se utilizan, están equipados con motores de encendido por chispa que emplean gasolina como combustible, y actualmente emiten grandes cantidades de gases tóxicos y de efecto invernadero (Kassem *et al.*, 2019); entre ellos, los compuestos orgánicos volátiles (COV) son contaminantes importantes, ya que además de que algunos de ellos son nocivos para la salud, también son precursores de la formación de ozono (Mugica-Álvarez *et al.*, 2020).

La introducción de éstos contaminantes en la atmósfera no solo se debe al uso de vehículos de combustión interna sino también por procesos naturales en menor medida,

estos contaminantes atmosféricos, forman lo que hoy se conoce como smog, que es una mezcla de humo y niebla, de ahí el nombre de "smog", pero hoy en día tiene una definición y composición más específicas, se sabe que el smog está formado por muchas sustancias químicas, como los NO_x, el dióxido de azufre (SO_x), el CO y los COV, pero los dos componentes principales del smog son las partículas (PM) y el ozono troposférico (O₃) (Sánchez *et al.*, 2019; Tyler *et al.*, 2011).

El smog normal (a menudo llamado smog tipo Londres) es principalmente un producto de la quema de grandes cantidades de carbón con alto contenido de azufre. Por su parte, el smog fotoquímico es un fenómeno que suele producirse por las emisiones de los vehículos en contacto con la luz solar, principalmente por la combustión de gasolina y diésel (Sher, 1998). Las ciudades cálidas y densamente pobladas con un gran parque vehicular son las que presentan mayores concentraciones de smog fotoquímico.

Dicho smog se produce cuando la luz ultravioleta del sol reacciona con los óxidos de nitrógeno en la atmósfera. Los óxidos de nitrógeno producidos en el motor del automóvil se introducen en la atmósfera, los cuales pueden combinarse con agua para formar ácido nítrico o reaccionar con la luz solar para producir átomos de oxígeno, que luego se combinan con oxígeno molecular para producir ozono (Nugent, 2002). El ácido nítrico puede precipitarse en la superficie terrestre como resultado de la lluvia ácida o bien permanecer en el smog.

Por otra parte, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) que son emitidos por la combustión de combustibles fósiles, cuando entran en contacto con la radiación ultravioleta se llevan a cabo una serie compleja de reacciones con los hidrocarburos para producir los componentes del smog fotoquímico, el cual, como se mencionó es una mezcla de ozono, ácido nítrico, aldehídos, nitratos de peroxiacilo (PAN) y otros contaminantes secundarios (Figura 9.2) (Tyler *et al.*, 2011).

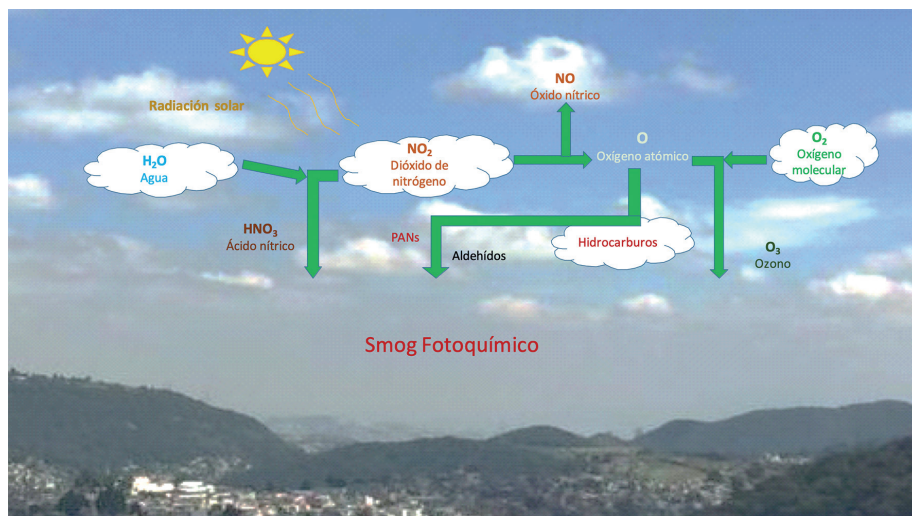


Figura 9.2 Esquema de formación de smog fotoquímico (adaptado de Tyler *et al.*, 2011).

El nitrato de peroxiacetilo (PAN, $\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{OONO}_2$) es un componente importante del smog fotoquímico, el cual también es un químico que se encuentra disperso en toda la tropósfera global. Una propiedad única de PAN es que es muy estable a bajas temperaturas, pero se descompone fácilmente para liberar NO_x a temperaturas cálidas. En ciertas atmósferas, puede actuar como portador y reservorio de NO_x , necesario para la formación de ozono (Singh, 2015).

9.2 Normatividad de las emisiones de los vehículos en México

Las emisiones de los vehículos en las grandes metrópolis de México están normadas por la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA), organismo que, a través de la Dirección General de Calidad del Aire, publica semestralmente en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México el Programa de Verificación Vehicular Obligatorio para el semestre en cuestión. La última publicación se presentó el 3 de enero del 2023 (SEDEMA, 2023).

La normatividad mexicana vigente tiene como objetivo: Evaluar los niveles de emisiones contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina, gas, diésel o cualquier otro combustible alternativo que cuenten con placas de cualquier entidad federativa de la Zona Metropolitana del Valle de México, o que circulen en la Megalópolis, conforme a lo establecido en las leyes aplicables, las Normas Oficiales Mexicanas y las Normas Técnicas Ambientales; así como establecer los mecanismos que coadyuven en la prevención, control y disminución de emisiones contaminantes a la atmósfera.

Actualmente existe un Convenio de Coordinación por el que se crea la Comisión Ambiental de la Megalópolis, que ha establecido un Programa con un marco normativo, el cual constituye un instrumento de política ambiental, para garantizar el derecho de toda persona a vivir en un ambiente sano para su desarrollo y bienestar, así como mantener dentro de los parámetros las emisiones provenientes del escape de los automotores, que establecen las Normas, los niveles de contaminación atmosférica que permitan preservar la calidad del aire y salvaguardar la salud de los mexicanos (SEDEMA, 2021).

9.2.1 Marco normativo

En el Diario Oficial de la Federación, se establecen las características del equipo y el procedimiento de medición para la verificación de los límites de emisión de contaminantes, provenientes de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos; estas normas son de observancia obligatoria para los responsables de los Centros de Verificación o Unidades de Verificación Vehicular autorizados, proveedores de equipos de verificación, de insumos y laboratorios de calibración.

Dicho marco normativo ha cambiado ligeramente desde lo publicado en la NORMA Oficial Mexicana NOM-041-SEMARNAT-2015, que establece los límites máximos per-

misibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible (ver tabla 9.1), a lo publicado en la NORMA Oficial Mexicana NOM-050-SEMARNAT-2018, que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos (ver tabla 9.2).

Comparando ambas tablas, se observa que los límites máximos permisibles han cambiado tanto en el método de prueba dinámico como el estático para modelos 1993 y anteriores, ya que por ejemplo en el método de prueba dinámico para HC pasó de 350 a 200 ppmh, el CO de 2.5 a 1%, los NO_x de 2,500 a 1,000 ppm y la dilución CO + CO₂ de 13–16.5 a 7–14.3% vol., y en el método de prueba estático para HC pasó de 400 a 220 ppmh, el CO de 3 a 1% y la dilución CO + CO₂ de 13–16.5 a 7–14.3% vol.

Tabla 9.1 Límites máximos permisibles
de emisión de contaminantes según método de prueba (2014).

Método de prueba	Año Modelo	Hidrocarburos (HC) μmol/mol (ppmh)	Monóxido de Carbono (CO) cmol/mol (%)	Óxidos de Nitrógeno (NO _x) μmol/mol (ppm)	Oxígeno (O ₂) cmol/mol (%)	Dilución (CO + CO ₂) cmol/mol (% vol)		Factor Lambda
						Mín.	Máx.	
Dinámico	1990 y Anteriores 1991 y posteriores	350	2.5	2,500	2.0	13	16.5	1.05
		100	1.0	1,500	2.0	13	16.5	1.05
Estático	1993 y Anteriores 1994 y posteriores	400	3.0	No aplica	2.0	13	16.5	1.05
		100	1.0	No aplica	2.0	13	16.5	1.05

Tabla 9.2 Límites máximos permisibles de emisión de contaminantes según método de prueba (2018).

Método de prueba	Año Modelo	Hidrocarburos (HC) $\mu\text{mol/mol}$ (ppmh) ^a	Monóxido de Carbono (CO) cmol/mol (%)	Óxidos de Nitrógeno (NOx) $\mu\text{mol/mol}$ (ppm)	Oxígeno (O ₂) cmol/mol (%)	Dilución (CO + CO ₂) cmol/mol (% vol)		Factor Lambda
						Mín.	Máx.	
Dinámico	1993 y anteriores 1994 y posteriores	200	1	1,000	2	7	14.3	1.05
		100	1	1,000	2	7	14.3	1.05
Estático	1993 y anteriores 1994 y posteriores	220	1	No aplica	2 ^b	7	14.3	1.05 ^b
		150	1	No aplica	2 ^b	7	14.3	1.05 ^b

a ppmh: partes por millón referido al hexano.

b No aplica para vehículos que operan con mezcla pobre en ralentí, conforme a las especificaciones establecidas por el fabricante.

En las Tablas 9.3-9.7, se muestran los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes provenientes de los diferentes vehículos automotores conforme al Programa de Verificación Vehicular Obligatoria para el Primer Semestre del año 2022 y en la Tabla 9.8, se muestran los límites de opacidad para vehículos automotores a diésel conforme a la norma correspondiente.

Todas las normas oficiales mexicanas, así como la información reportada en cada tabla fueron extraídas de las Gacetas Oficiales del Gobierno de la CDMX (SEDEMA, 2023) y del Estado de México (SEDEMA, 2021).

Tabla 9.3 Límites máximos permisibles de emisión de contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación para los métodos de prueba dinámica o estática. (HOLOGRAMA "0").

Hidrocarburos (HC) $\mu\text{mol/mol}$ (MOL) (ppmh)	Monóxido de carbono (CO) cmol/mol (%)	Óxidos de Nitrógeno (NOx) $\mu\text{mol/mol}$ (MOL) (ppmh)	Oxígeno (O ₂) cmol/mol (%)	Dilución (CO+CO ₂) cmol/mol (%)		Factor Lambda
				Min.	Máx.	
80	0.4	250	0.4	13	16.5	1.03
				7*	14.3*	

Nota de equivalencias: ppmh, partes por millón referido al hexano.

Los óxidos de nitrógeno que se señalan en la presente Tabla no aplicarán en la prueba estática.

* Valores aplicados para vehículos automotores a gas.

Los vehículos cuyas características técnicas no hayan sido registradas por parte de las empresas que los fabrican o comercializan en el país, se verificarán con procedimiento estático.

Tabla 9.4 Límites máximos permisibles para vehículos a gasolina con convertidos catalítico. (HOLOGRAMA "1").

Prueba	HC (ppm)	CO (%vol)	NOx (ppm)	(CO+CO ₂) (%vol)		O ₂ (%vol)	Factor Lambda
				Min.	Máx.		
Dinámica	100	0.7	700	13.0	16.5	2.0	1.03
Estática	100	0.5	No aplica	13.0	16.5	2.0	NA/1.03 relenti/crucero

Los vehículos cuyas especificaciones técnicas no estén registradas por el fabricante o comercializador, se verificará mediante el procedimiento estático.

Tabla 9.5 Límites máximos permisibles para vehículos a gas u otros combustibles alternos de fábrica o vehículos convertidos. (HOLOGRAMA "1").

Prueba	HC (ppm)	CO (%vol)	NOx (ppm)	(CO+CO ₂) (%vol)		O ₂ (%vol)	Factor Lambda
				Min.	Máx.		
Dinámica	100	1.0	1,000	07.0	14.3	2.0	1.05
Estática	100	1.0	No aplica	07.0	14.3	2.0	NA/1.05 relenti/crucero

Los vehículos cuyas especificaciones técnicas no estén registradas por el fabricante o comercializador, se verificará mediante el procedimiento estático.

Tabla 9.6 Límites máximos permisibles para vehículos a gasolina que cuenten con carburador. (HOLOGRAMA "2").

Prueba	HC (ppm)	CO (%vol)	NOx (ppm)	(CO+CO ₂) (%vol)		O ₂ (%vol)	Factor Lambda
				Min.	Máx.		
Dinámica	350	2.5	200	13.0	16.5	2.0	1.05
Estática	400	3.0	No aplica	13.0	16.5	2.0	NA/1.05 relenti/crucero

Los vehículos cuyas especificaciones técnicas no estén registradas por el fabricante o comercializador, se verificará mediante el procedimiento estático.

Tabla 9.7 Límites máximos permisibles para vehículos a gas u otros combustibles alternos de fábrica o vehículos convertidos que cuenten con carburador (HOLOGRAMA "2").

Prueba	HC (ppm)	CO (%vol)	NOx (ppm)	(CO+CO ₂) (%vol)		O ₂ (%vol)	Factor Lambda
				Min.	Máx.		
Dinámica	200	1.0	1,000	07.0	14.3	2.0	1.05
Estática	200	1.0	No aplica	07.0	14.3	2.0	NA/1.05 relenti/crucero

Los vehículos cuyas especificaciones técnicas no estén registradas por el fabricante o comercializador, se verificará mediante el procedimiento estático.

Tabla 9.8 Límites de opacidad para vehículos automotores a diésel.
(HOLOGRAMA "2").

Características del tren motriz	Peso Bruto Vehicular	Coefficiente de absorción de luz (m-1)
2003 y anteriores	Mayor de 400 kg hasta 3.857 kg	2.00
2004 y posteriores	Mayor de 400 kg hasta 3.857 kg	1.50
1997 y anteriores	Mayor de 3.857 kg	2.25
1998 y posteriores	Mayor de 3.857 kg	1.50

9.3 Emisiones de fuentes móviles en México y el mundo

A pesar de todos los esfuerzos realizados para eliminar las emisiones de especies contaminantes al aire, dentro de las que destacan: uso tanto de vehículos como de combustibles que tengan emisiones cada vez menores, uso de vehículos pesados con motor diésel también cada vez más limpios y, especialmente el uso de combustibles con bajo contenido de azufre; sin embargo, aun tomando los anteriores esfuerzos, las emisiones de fuentes móviles aún son un problema a nivel mundial, por el uso excesivo de vehículos con motores de combustión interna, imprescindibles en la sociedad actual. Tanto en México, como en la mayoría de los países, el transporte público es el sector de mayor consumo de energía y por ende el mayor generador de emisiones de gases contaminantes. Generalizando, los motores de combustión interna, que emplean gasolina o diésel como combustible, continúan siendo los generadores de emisiones al ambiente de un sinnúmero de gases que alteran la composición natural y que deterioran la calidad del aire en las grandes metrópolis.

Debido a la problemática ocasionada por la emisión de gases contaminantes, en casi todas las grandes ciudades del mundo se han establecido leyes y/o regulaciones respecto a las emisiones de gases, que actualmente están obligando a los fabricantes de automóviles a mitigarlas, los cuales han desarrollado diseños de motores que cumplen con las normativas que se han establecido en cada país. En casi todas las legislaciones se ha tomado en cuenta que los principales elementos nocivos que se encuentran en los gases de escape de los motores son: el CO₂, el CO, el SO₂, los NO_x, los hidrocarburos HC y las partículas.

En la Figura 9.3 (imagen extraída del libro *Gasoline Engine Management Systems and Components* de Bosch Automotive Professional, 2015), se presenta un mapa en donde se describe la legislación adoptada por país, por ejemplo: en Estados Unidos se ha

establecido la legislación CARB, la cual fue implementada en el estado de California, Nueva York y Maine, así como en British Columbia en Canadá. Por otra parte, la norma EPA está implementada en el resto de los estados tanto de Estados Unidos como en Canadá. En el Continente Europeo existe la regulación EURO la cual es implementada en toda la Unión Europea. Otros países que han adoptado la legislación EURO son algunos países del Continente Africano como Sudáfrica y Egipto. Finalmente, en países como México, Australia, Tailandia, Malasia y países de Sur América han adoptado la normatividad EPA, al igual que países del continente asiático (excepto Japón quien cuenta con su propia legislación).

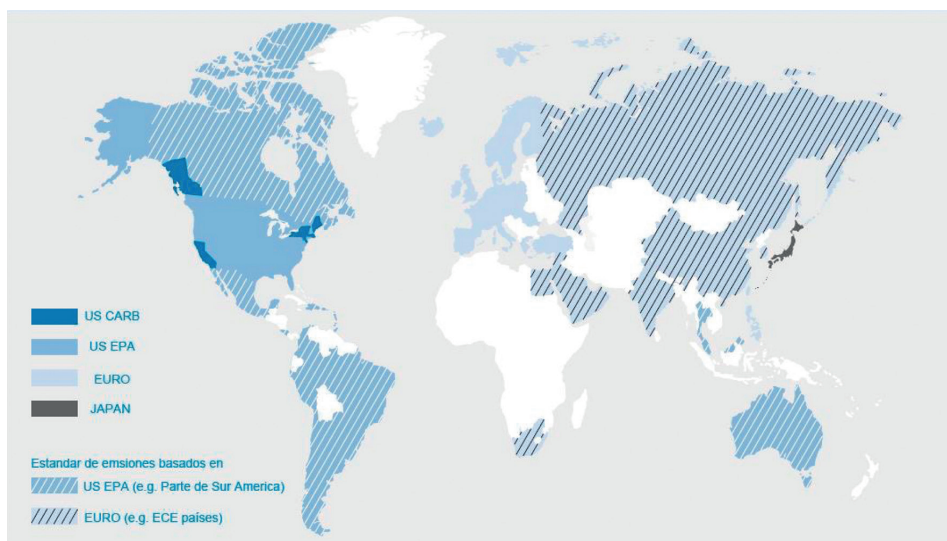


Figura 9.3 Áreas de aplicación de la regulación para los vehículos de pasajeros y vehículos comerciales.

Con base a esta normatividad en la Figura 9.4, se presentan los límites máximos permitidos de emisiones en gramos de contaminante por kilómetro recorrido, para algunas regiones del mundo y para algunas especies contaminantes como son: NO_x, HC, CO y CO₂ y se aprecia que la legislación en países del continente asiático es más laxa con respecto al resto del mundo incluyendo México (Sánchez *et al.*, 2019).

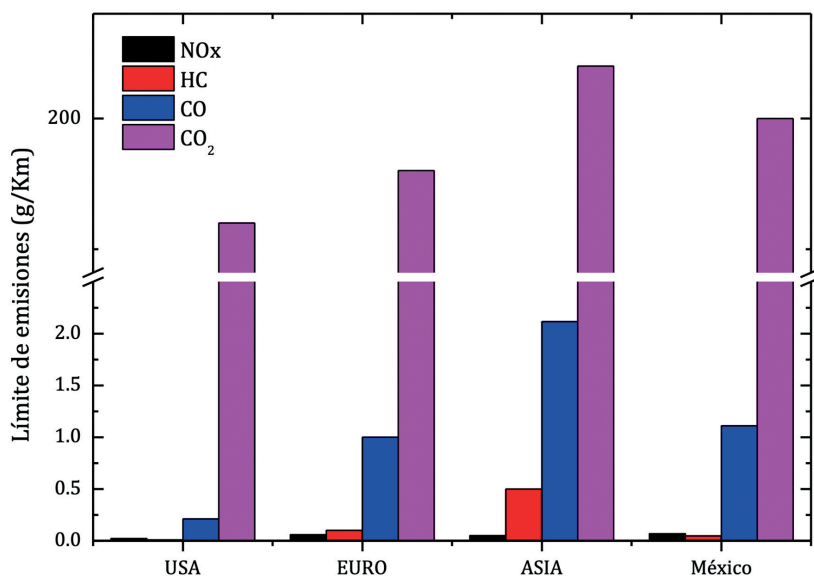


Figura 9.4 Límite de emisiones de especies contaminantes en el mundo en 2022 de óxidos de nitrógeno, hidrocarburos sin metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono.

Con el fin de comparar el porcentaje de emisiones por especie contaminante en México con el resto del mundo, en la Figura 9.5, se presentan los gráficos con datos reportados de cada especie contaminante en el año 2019, año previo a la pandemia de COVID-19. Cabe mencionar que los datos reportados para Asia contemplan emisiones principalmente de Japón, China e India, y se contempla información global de otros países como República de Korea, Taiwán y Malasia (Kurokawa y Ohara, 2019). La información para el continente europeo se recabó del Inventario anual de gases de efecto invernadero de la Unión Europea 1990-2019 e informe del inventario 2021 (UNFCCC Secretaria, 2021). La información de Estados Unidos fue obtenida del Inventario de emisiones y sumideros de gases de efecto invernadero de EE. UU.: 1990-2019 (EPA, 2021). Finalmente, los datos de México fueron obtenidos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 1990-2019 (INECC, 2022).

Las emisiones en México para las especies contaminantes reportadas son cercanas a las reportadas para la Comunidad Europea e inferiores a las reportadas para el continente asiático y muy por arriba de las reportadas para los Estados Unidos.

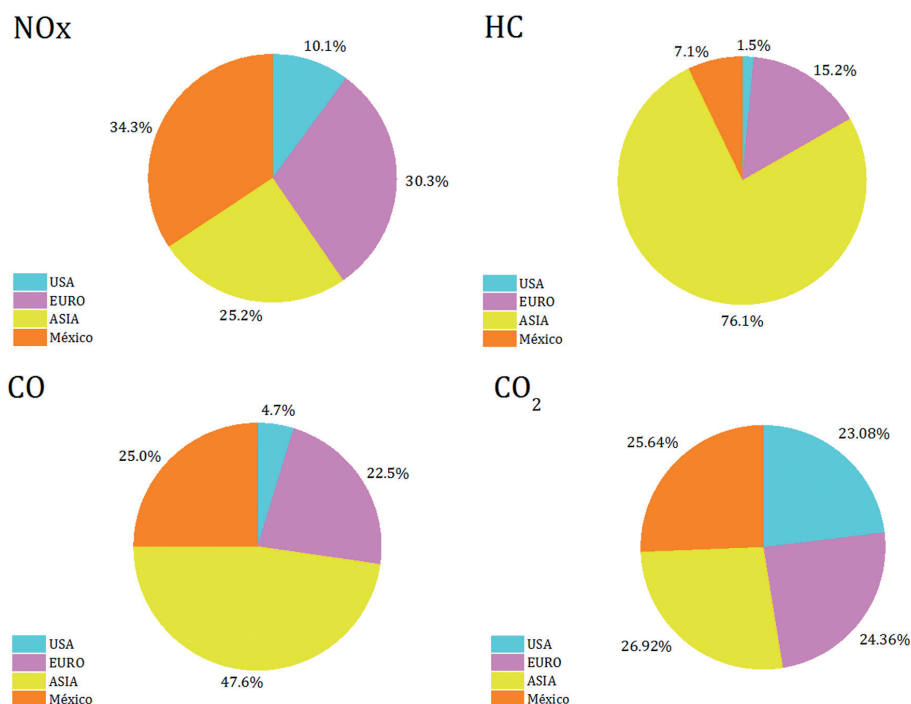


Figura 9.5 Emisiones de especies contaminantes en el mundo en 2019.

9.4 Control químico de las emisiones vehiculares

Para tener un control de las emisiones vehiculares y disminuir los problemas de contaminación generada por las fuentes móviles fue necesario el desarrollo de los convertidores catalíticos, los cuales fueron implementados por primera vez en vehículos fabricados en 1975, en donde se tomaron en cuenta las regulaciones aprobadas por la EPA en 1973. Las principales exigencias eran, la reducción de las emisiones de los automóviles y la disminución gradual en el contenido de plomo de todos los combustibles. Dado que la EPA estableció que el plomo expulsado por los automóviles significaba una amenaza directa a la salud de los seres humanos. Es importante hacer notar que, aunque el convertidor catalítico se desarrolló desde la década de 1950, éste no usó en los vehículos debido al plomo en la gasolina en dicha década sino hasta los años 70. La regulación del control de emisiones de los vehículos estableció en ese momento que los motores por sí solos no tienen la capacidad de cumplir con los límites establecidos, requiriendo de componentes que eliminen los gases tóxicos y peligrosos que se forman

en la combustión y fueron los catalizadores los que permitieron convertir los gases tóxicos en gases inofensivos, como son: el dióxido de carbono, el vapor de agua y el nitrógeno (Bosch, 2014).

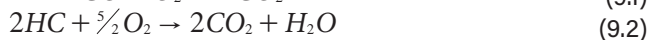
9.4.1 Catálisis

El catalizador se compone de un soporte cerámico de estructura monolítica multi-canal tipo “nido de abeja”, que sirve de base para dispersar la fase activa, montado dentro de una carcasa metálica aislado térmicamente y resistente a las vibraciones. Como materiales de soporte es usado la cordierita y en menor grado soportes metálicos. La idoneidad de la estructura monolítica para aplicaciones automotrices ha quedado demostrada a lo largo de un período de desarrollo. Ofrece las siguientes ventajas: máxima utilización de la superficie catalítica, durabilidad combinada con resistencia física, baja retención térmica y contrapresión de los gases de escape muy baja.

La capa catalítica activa está formada por pequeñas partículas de metales nobles (Pt, Rh, Pd) sensible al envenenamiento por plomo; por este motivo, es fundamental que los motores con catalizador funcionen exclusivamente con combustible sin plomo, ya que el plomo envenena la fase activa desactivándola rápidamente. La tasa de conversión es en gran medida función de la temperatura de funcionamiento, el rango de temperaturas de funcionamiento recomendables se encuentra en un rango aproximado entre 400 a 800 °C para una máxima eficiencia y una vida útil prolongada (Boch, 2008; Sideris, 1998; Bartholomev, 2005).

9.4.2 Convertidores catalíticos de una y dos vías

Históricamente los primeros convertidores catalíticos son conocidos como de una vía (1976-1979) (Figura 9.6), se desarrollaron para la reacción de oxidación y tienen la finalidad de oxidar el CO e HC no quemados en los gases de escape y transformarlos en CO₂ y H₂O (Ecuación 9.1 y 9.2).



En los motores de inyección de combustible, el oxígeno necesario para la oxidación se obtiene simplemente aumentando la cantidad de aire en la mezcla aire/combustible del motor. En los motores que utilizan carburadores, es necesario un suministro de aire secundario en el tubo de escape antes del convertidor (Sideris, 1998).

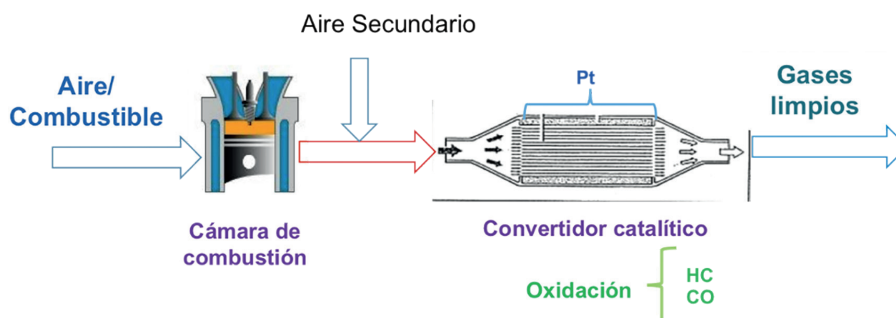


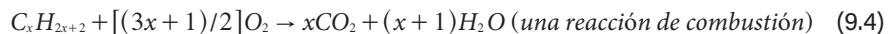
Figura 9.6 Esquema de un convertidor catalítico de una vía.

Por otra parte, el convertidor catalítico de dos vías (1979 – 1981) (Figura 9.7) tiene dos tareas simultáneas:

I. Oxidación de monóxido de carbono a dióxido de carbono:



II. Oxidación de hidrocarburos (combustible no quemado y parcialmente quemado) a dióxido de carbono y agua:



Este tipo de convertidor catalítico se utiliza ampliamente en motores diésel para reducir las emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono. También se utilizaron en motores de gasolina de automóviles de los mercados estadounidense y canadiense hasta 1981, pero debido a su incapacidad para controlar los óxidos de nitrógeno, fueron reemplazados por convertidores de tres vías.

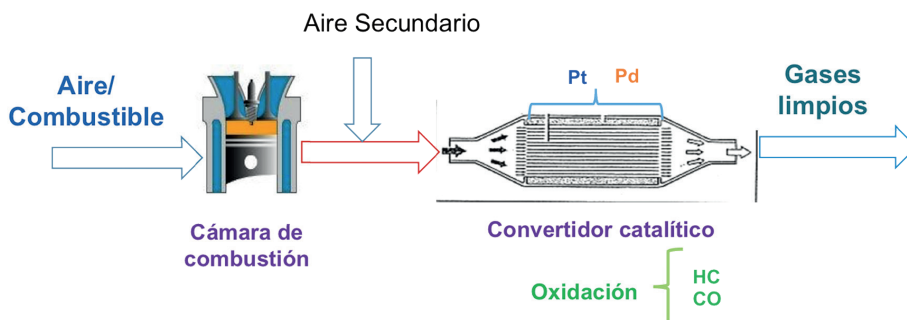


Figura 9.7 Esquema de un convertidor catalítico de dos vías.

9.4.3 Convertidores catalíticos de tres vías

Desde 1981, se han utilizado convertidores catalíticos de “tres vías” (oxidación-reducción) (Figura 9.8) en sistemas de control de emisiones de vehículos en muchos países donde se han tenido que adoptar estrictas regulaciones sobre emisiones de vehículos que, requieren convertidores de tres vías en los vehículos a gasolina. Los catalizadores de reducción y oxidación normalmente están contenidos en una carcasa común, aunque en algunos casos pueden estar alojados por separado. Un catalizador de tres vías cumple tres funciones simultáneas:

I. Reducción de óxidos de nitrógeno a nitrógeno y oxígeno:



II. Oxidación de monóxido de carbono a dióxido de carbono:



III. Oxidación de hidrocarburos no quemados (HC) a dióxido de carbono y agua:

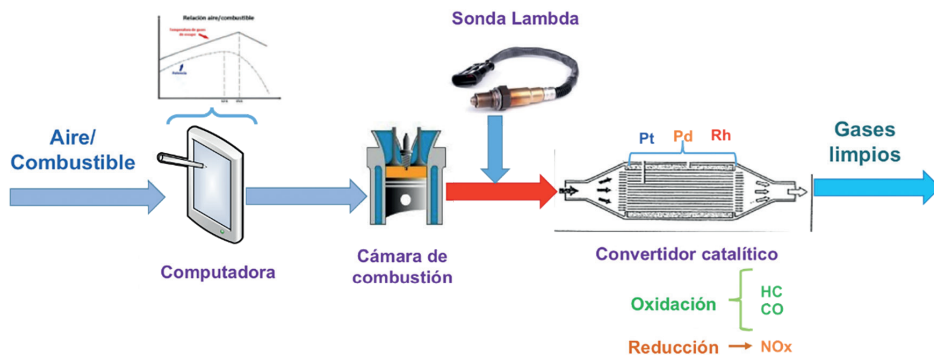


Figura 9.8 Esquema de un convertidor catalítico de tres vías.

Estas tres reacciones ocurren de manera más eficiente cuando el convertidor catalítico recibe los gases de combustión por encima del punto estequiométrico. Este punto está entre 14.6 y 14.8 partes de aire por 1 parte de combustible en peso. En general, los motores equipados con convertidores catalíticos de 3 vías están equipados con un sistema computarizado de inyección de combustible con retroalimentación de circuito cerrado que utiliza uno o más sensores de oxígeno, aunque al inicio del uso de los con-

vertidores de tres vías se utilizaron carburadores equipados para el control de la mezcla con retroalimentación.

Los catalizadores de tres vías son eficaces cuando el motor funciona dentro de una banda estrecha de relaciones aire-combustible cercanas a la estequiométrica, de modo que los gases de escape oscilan entre condiciones ricas (exceso de combustible) y pobres (exceso de oxígeno). Sin embargo, la eficiencia de conversión cae muy rápidamente cuando el motor funciona fuera de esa banda de relaciones aire-combustible. En condiciones de funcionamiento pobre del motor, hay exceso de oxígeno y no se favorece la reducción de NOx. En condiciones ricas, el exceso de combustible consume todo el oxígeno disponible antes del catalizador, por lo que sólo el oxígeno almacenado está disponible para la función de oxidación. Los sistemas de control de circuito cerrado son necesarios debido a las condiciones para una reducción efectiva de NOx y oxidación de HC. El sistema de control debe evitar que el catalizador de reducción de NOx se oxide por completo y, al mismo tiempo, reponer el material de almacenamiento de oxígeno para mantener su función como catalizador de oxidación.

Este tipo de convertidor de tres vías puede almacenar oxígeno de la corriente de gases de escape, generalmente cuando la relación aire-combustible es pobre. Cuando no hay suficiente oxígeno disponible en la corriente de escape, el oxígeno almacenado se libera y se consume. Una falta de oxígeno suficiente se produce cuando el oxígeno derivado de la reducción de NOx no está disponible o cuando ciertas maniobras, como una aceleración fuerte, enriquecen la mezcla más allá de la capacidad del convertidor para suministrar oxígeno.

En el catalizador de tres vías se pueden producir reacciones no deseadas, como la formación de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3). La formación de cada uno puede limitarse mediante modificaciones en la etapa de lavado y los metales preciosos utilizados. Es difícil eliminar estos subproductos por completo. Los combustibles libres de azufre o bajos en contenido de azufre eliminan o reducen el sulfuro de hidrógeno (Schwarz *et al.*, 1999; Boch, 2008; Sideris, 1998).

9.5 Reflexiones y conclusiones

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la calidad del aire en las zonas urbanas pequeñas, medianas o densamente pobladas, está fuertemente relacionado con el uso de automóviles de combustión interna como medio de transporte para la movilidad de las personas por motivos de trabajo, esparcimiento y recreativas, y también por el uso de vehículos automotores para el traslado de alimentos, envío de mercancías, asistencia médica, entre muchas otras actividades antropogénicas. La mayoría de estos vehículos son movidos con motores de combustión interna que usan como combustible gasolina, gas licuado o diésel, estos dispositivos tienen una baja eficiencia en el proceso de combustión, generando grandes cantidades de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono, una amplia variedad de hidrocarburos secundarios, óxidos de nitrógeno y partículas finas. Estos compuestos son responsables de la contaminación del aire que se relaciona con un sinnúmero de problemas de salud en los seres humanos. Una de las

acciones para apalea esta problemática, como ya se mencionó, en los años 70 se dio inicio al desarrolló de los primeros convertidores catalíticos con el objetivo de proteger la salud de las personas y combatir la contaminación del aire proveniente de vehículos automotores de combustión interna.

Estos dispositivos han permitido una reducción efectiva de una amplia variedad de gases contaminantes del aire, por lo que hoy en día los convertidores catalíticos de tres vías son un componente indispensable en todos los automóviles y camiones ligeros. Además, es importante recordar que, a pesar de los avances en el uso de la nueva generación de autos híbridos, que usan un motor eléctrico acoplado a un motor de combustión interna, también en este segmento de vehículos, debe usarse un convertidor catalítico para convertir los gases provenientes de los motores de combustión a gases más amigables para el medio ambiente y así continuar protegiendo la salud de las personas y la calidad del aire en las ciudades. Un segundo efecto por el uso de los convertidores catalíticos es la disminución del ozono fotoquímico, al eliminar los NOx que son precursores en la formación de una capa de ozono a nivel del suelo, por lo tanto, las reacciones con este gas se ven disminuidas en zonas densamente pobladas, como es la Megalópolis y en especial la zona metropolitana de la Ciudad de México.

Referencias

1. Bartholomew C.H. y Farrauto R.J. (2005). *Fundamentals of Industrial Catalytic Processes*, 2st edition, Estados Unidos. Wiley Interscience.
2. Bosch Automotive Professional. (2015). *Gasoline Engine Management Systems and Components*. Alemania, Germany: Konrad Reif.
3. Bosch Professional Automotive. (2014). *Diesel Engine Management Systems and Components*. Alemania, Germany: Konrad Reif.
4. EPA, Environmental Protection Agency. (2022). *What Vehicles, Engines and Pollutants are Regulated by EPA?*. Recuperado el 2 de diciembre de 2022 de <https://www.epa.gov/transportation-air-pollution-and-climate-change/overview-air-pollution-transportation>
5. EPA, Environmental Protection Agency. (2023). *Transportation, Air Pollution, and Climate Change*. Recuperado el 19 de julio de 2023 de <https://www.epa.gov/transportation-air-pollution-and-climate-change>
6. EPA, Environmental Protection Agency. (2023). *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2019. EPA 430-R-21-005. And U.S. Government to meet U.S. commitments under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*. Recuperado el 25 de enero de 2023 de <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2019>
7. EPA, Environmental Protection Agency. (2022). *EPA History: Clean Air Act of 1970/1977*, Recuperado el 30 de septiembre de 2022 de <https://www.epa.gov/history/epa-history-clean-air-act-1970-1977>

8. Ferguson C.R. y Kirkpatrick A.T. (2015). Internal combustion engines: applied thermosciences. 2nd ed. Estados Unidos, New York, John Wiley & Sons.
9. INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2022). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero 1990-2019*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/737226/156_2022_INEGY-CEI_1990-2019_NIR.pdf.
10. Kassem, M.G.A., Ahmed, A.M., Abdel-rahman, H.H. y Moustafa, H.E. (2019) Use of span 80 and tween 80 for blending gasoline and alcohol in spark ignition engines. *Energy Reports*, 5, 221–230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2019.01.009>.
11. Kurokawa, J. y Ohara, T. (2020). Long-term historical trends in air pollutant emissions in Asia: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 3.1. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20 (21), 12761–12793. <https://doi.org/10.5194/acp-20-12761-2020>.
12. Miller, T.G. y Spoolman, S.E. (2012). Sustaining Environmental Quality (Air Pollution) in *Living in the Environment*, 17 ed. Nelson, Capítulo 18, pp.455-480. Canada, Brooks/Cole CENGAGE learning.
13. Mugica-Álvarez, V., Martínez-Reyes, C.A., Santiago-Tello, N.M., Martínez-Rodríguez, I., Gutiérrez-Arzaluz, M. y Figueroa-Lara, J.J. (2020). Evaporative volatile organic compounds from gasoline in Mexico City: Characterization and atmospheric reactivity. *Energy Reports*, 6, 825-830. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.010>.
14. Nugent O. (2002). *The Smog Primer*. <https://policycommons.net/artifacts/1207637/the-smog-primer/1760748/>
15. Sánchez-Vela, L.G., Fabela-Gallegos, M.J., Flores-Centeno, O., Hernández-Jiménez, J.R., Vázquez-Vega, D., y Cruz-Acevedo, M.E. (2019). Revisión de la normativa internacional sobre límites de emisiones contaminantes de vehículos de carretera. *INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE y SCT*. Publicación Técnica No. 562, Sanfandila, Querétaro. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt562.pdf>
16. SEDEMA, Secretaría del Medio Ambiente. (2021). *Programa de verificación vehicular obligatoria para el primer semestre del año 2022*. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México. Recuperado el Martes 21 de diciembre de 2021 Sección Primera Tomo: CCXII No. 118. Gaceta del Gobierno. Legislación.edomex.gob.mx. . <https://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/TramitesServicios/VerificacioVehicular/2022/Programa%20de%20Verificación%20Vehicular%20Obligatoria%20para%20el%20Primer%20Semetre%20del%20Año%202022.pdf>
17. SEDEMA, Secretaría del Medio Ambiente. (2023). *Programa de Verificación Vehicular Obligatorio para el primer semestre de 2023*, Secretaría del Medio Ambiente de CDMX, Dirección General de Calidad del Aire, Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Recuperado el 3 de Enero de 2023 de <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/publica-sedema-primer-semestre-de-verificacion-vehicular-2023>.

18. Schwarz, H., Günther, D., König, G., Schnaibel, E. y Dieter, W. (1999). *Emissions Control for gasoline engines*. Stuttgart. Alemania. Robert Bosch GmbH.
19. Sideris, M. Th. (1998). *Methods for Monitoring and Diagnosing the Efficiency of Catalytic Converters. A Patent-oriented Survey*. 1st Edition. Amsterdam. Elsevier.
20. Sher, E. (1998). Environmental Aspects of Air Pollution, Eran Sher (Ed.), *Handbook of Air Pollution. From Internal Combustion Engines, Pollutant Formation and Control*. Capítulo 2 (pp 27-41) Amsterdam, Elsevier.
21. Singh, H.B. (2015). Tropospheric chemistry and composition. Peroxyacetyl Nitrate. Gerald R. North, G.R, Pyle, J., Zhang, F. (Ed.) *Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Reference Work*. (Second Edition), (pp. 251-254) Amsterdam, Elsevier.
22. UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change (2021). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2019 and inventory report 2021*. Submission to the UNFCCC Secretariat. EEA/PUBL/2021/066. European Commission, DG Climate Action European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/annual-european-union-greenhouse-gas-inventory-2021>
23. Wang, J., Chen, H., Hu, Z., Yao M. y Li, Y. (2015). A Review on the Pd-Based Three-Way Catalyst, *Catalysis Reviews*, 57:1, 79-144. <https://doi.org/10.1080/01614940.2014.977059>