



---

---

# REVISIÓN DE LA NORMATIVA INTERNACIONAL SOBRE LÍMITES DE EMISIONES CONTAMINANTES DE VEHÍCULOS DE CARRETERA

Luis Gerardo Sánchez Vela  
Manuel de Jesús Fabela Gallegos  
Oscar Flores Centeno  
José Ricardo Hernández Jiménez  
David Vázquez Vega  
Mauricio Eliseo Cruz Acevedo

**Publicación Técnica No. 562**  
**Sanfandila, Qro., 2019**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Revisión de la normativa internacional sobre límites de  
emisiones contaminantes de vehículos de carretera**

**Publicación Técnica No. 562**  
**Sanfandila, Qro, 2019**

---



Esta publicación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 28/18 Revisión de la normativa internacional sobre límites de emisiones contaminantes de vehículos de carretera. Dicho proyecto fue realizado en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Ing. Luis Gerardo Sánchez Vela, el Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos, el M. C. Oscar Flores Centeno, el M. C. José Ricardo Hernández Jiménez y el M. en C. David Vázquez Vega, investigadores de Dinámica Vehicular.

Se agradece la colaboración del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por sus valiosos comentarios y recomendaciones para la elaboración de esta publicación. También se agradece el apoyo brindado por el Ing. Mauricio Eliseo Cruz Acevedo, así como por los estudiantes de la Universidad Politécnica de Santa Rosa Jáuregui, María Guadalupe Reséndiz Sánchez y Miguel Ángel López Rodríguez.



# Contenido

---

Índice de figuras .....	v
Índice de tablas .....	vii
Sinopsis.....	ix
Abstract .....	xi
Resumen Ejecutivo .....	xiii
Introducción.....	1
1 Antecedentes .....	3
1.1 Historia de los vehículos automotores.....	3
1.2 Historia del control de emisiones vehiculares .....	4
1.3 Contaminación y calidad del aire .....	5
1.4 Tipos de emisiones contaminantes en la atmosfera .....	6
1.4.1 Clasificación de los gases que provocan la contaminación del aire ....	7
1.4.2 Efectos de los gases contaminantes en el ser humano.....	8
1.5 Registro de emisiones de gases de efecto invernadero.....	10
1.6 Parque vehicular en México .....	13
1.7 Consumo energético en México por el autotransporte .....	14
2 Emisiones contaminantes producidas por los vehículos de carretera .....	17
2.1 Emisiones evaporativas .....	17
2.2 Emisiones provenientes del tubo de escape .....	18
2.2.1 Emisiones en motores a gasolina .....	19
2.2.2 Emisiones en motores a diésel.....	21
3 Normatividad de emisiones para vehículos de carretera.....	23
3.1 Límites de emisiones por legislación CARB.....	24

3.2	Límites de emisiones por legislación EPA.....	25
3.3	Límites de emisiones por legislación EURO .....	27
3.4	Límites de emisiones por legislación Japonesa .....	28
3.5	Límites de emisiones por legislación en México .....	29
4	Tecnologías para la reducción de emisiones de los MCI .....	41
4.1	Dispositivos que mejoran la combustión de los MCI .....	41
4.1.1	Turbocargador .....	42
4.1.2	Diagnóstico a Bordo (OBD) .....	45
4.1.3	Inyección electrónica de combustible .....	46
4.2	Dispositivos que mitigan las emisiones de los MCI .....	47
4.2.1	Convertidor catalítico .....	47
4.2.2	Catalizadores acumuladores de óxidos de nitrógeno .....	50
4.2.3	Recirculación de gases de escape .....	51
4.2.4	Filtro de partículas diésel.....	53
4.2.5	Reducción catalítica selectiva.....	54
4.3	Aplicación de la tecnología respecto a la normativa vigente .....	56
5	Comentarios.....	59
	Bibliografía .....	61

# Índice de figuras

---

Figura 1.1 Emisiones por sector en México .....	11
Figura 1.2 Tendencia de las emisiones por tipo de gas .....	11
Figura 1.3 Producción de bióxido de carbono por país .....	12
Figura 1.4 Crecimiento del parque vehicular en México.....	14
Figura 1.5 Consumo energético final por sector (Fuente: SENER) .....	15
Figura 1.6 Consumo energético final tipo de transporte .....	16
Figura 1.7 Consumo de combustible por tipo de transporte .....	16
Figura 2.1 Emisiones en vehículos de carretera .....	17
Figura 2.2 Composición de los gases de escape de un motor a gasolina.....	19
Figura 2.3 Composición de los gases de escape de un motor a gasolina.....	19
Figura 2.4 Emisiones formadas de acuerdo al factor exceso de aire .....	20
Figura 2.5 Potencia y consumo específico de combustible en relación a la cantidad aire combustible .....	21
Figura 2.6 Emisiones generadas de acuerdo al factor exceso de aire .....	22
Figura 3.1 Áreas de aplicación de la regulación para los vehículos de pasajeros y vehículos comerciales .....	24
Figura 3.2 Límites de emisiones para vehículos de pasajeros y vehículos pesados CARB .....	25
Figura 4.1 Turbocargador de geometría fija .....	43
Figura 4.2 Funcionamiento del turbocargador de geometría variable .....	43
Figura 4.3 Sistema de inyección electrónica .....	46
Figura 4.4 Convertidor catalítico.....	47
Figura 4.5 Convertidor catalítico de tres vías .....	48
Figura 4.6 Eficiencia del convertidor catalítico de tres vías .....	49
Figura 4.7 Convertidor catalítico de dos vías .....	49
Figura 4.8 sistema control de emisiones de inyección directa en motores a gasolina .....	50
Figura 4.9 Almacenamiento y regeneración de NOx.....	51
Figura 4.10 Recirculación de gases de escape.....	52
Figura 4.11 Diagrama de EGR a alta y baja presión .....	52
Figura 4.12 Influencia de la tasa de cambio del EGR .....	53
Figura 4.13 Filtro de partículas diésel .....	54
Figura 4.14 Reducción catalítica selectiva .....	55
Figura 4.15 Eficiencia histórica y proyectada en los motores a diésel de vehículos pesados .....	58



# Índice de tablas

---

Tabla 1.1 Emisiones de CO <sub>2</sub> emitidas por país .....	13
Tabla 3.1 Límites de emisiones para vehículos de pasajeros (automóviles y motocicletas).....	26
Tabla 3.2 Límites máximos de contenido de azufre en la gasolina .....	26
Tabla 3.3 Límites de emisiones para vehículos pesados .....	26
Tabla 3.4 Límites de emisiones para vehículos pasajeros .....	28
Tabla 3.5 Límites de emisiones para vehículos comerciales .....	28
Tabla 3.6 Límites de emisiones para los vehículos de pasajeros (nuevos estándares a largo plazo) .....	29
Tabla 3.7 Límites de emisión para los vehículos de pasajeros (crear nuevos estándares a largo plazo, propuestas) .....	29
Tabla 3.8 Límites máximos permisibles de emisión del método estático .....	31
Tabla 3.9 Límites máximos permisibles de emisión del método dinámico .....	31
Tabla 3.10 Límites máximos permisibles de emisiones para vehículos con estándar de durabilidad de 80 mil km.....	33
Tabla 3.11 Límites máximos permisibles de emisión para vehículos con estándar de durabilidad de 100 mil km.....	33
Tabla 3.14 Límites máximos permisiones de emisiones para motores certificados por la EPA.....	34
Tabla 3.15 Vida útil de los vehículos con motores nuevos certificados por la EPA .....	35
Tabla 3.16 Límites máximos permisiones de emisiones para motores certificados por la certificados por la EURO .....	35
Tabla 3.17 Vida útil de los vehículos con motores nuevos certificados por la EURO .....	36
Tabla 3.18 Límites máximos permisibles del escape para vehículos de un peso mayor a 3857 y menor a 6350 kg .....	36
Tabla 3.19 Límites máximos permisibles del escape para vehículos de un menor o igual a 2 840 que integren un motor diésel nuevo kg .....	37
Tabla 3.20 Equivalencia de las normas de emisiones de vehículos pesados de carretera a diésel .....	39
Tabla 3.21 Cronología de las aplicación de normas de emisiones.....	39
Tabla 4.1 Eficiencia volumétrica de motores de aspiración natural y motores sobrealimentados .....	42
Tabla 4.2 Pérdidas de potencia y par en MCI por altitud.....	44
Tabla 4.3 Medidas para reducir las emisiones contaminantes de los motores diésel .....	56
Tabla 4.4 Cronología de la normativa de emisiones y tecnología en vehículos a diésel .....	57



## **Sinopsis**

---

El presente trabajo muestra una revisión de la normatividad nacional e internacional en torno a las emisiones contaminantes provenientes de los automóviles que han afectado al medio ambiente en las últimas décadas. Incluye las referentes a organizaciones gubernamentales y agencias que se encargan de monitorear la calidad del aire, el consumo energético y aquéllas que han establecido los límites máximos permitidos de emisiones provenientes del escape de los vehículos. Como antecedente, se describe la operación y funcionamiento de los motores de combustión interna y la generación de emisiones contaminantes. También se presentan las tecnologías que se han utilizado para el cumplimiento de las normas aplicadas en distintas regiones y el impacto al utilizar los sistemas de control y reducción de emisiones, principalmente considerando los motores a gasolina y diésel.



# Abstract

---

A global review of normative related to polluting emissions produced by road vehicles is presented. Those referring to government organizations and agencies that are responsible for monitoring air quality, energy consumption and those that have established the maximum limits for emissions from the exhaust of vehicles, are included. Firstly, the operation and operation of internal combustion engines and the generation of polluting emissions is described. It also presents the technologies that have been used to comply with the regulations applied in different regions and the impact of using emission control and reduction systems, mainly considering gasoline and diesel engines.



## Resumen Ejecutivo

---

El uso de vehículos con motores de combustión interna, imprescindibles en la sociedad actual, es un factor que participa en la contaminación del aire. En México, el transporte es de los mayores generadores de emisiones y de mayor consumo de energía. Los motores de combustión interna, que en su mayoría emplea gasolina o diésel, emiten al ambiente diversos gases que alteran la composición natural y que deterioran la calidad del aire en el ambiente.

Las emisiones contaminantes son una preocupación a nivel mundial. Por tanto, se han propuesto leyes y regulaciones respecto a las emisiones de gases que obligan a los fabricantes a mitigarlas, diseñando motores que cumplan con las normativas que se promueve en cada país. Los principales elementos nocivos que se encuentran en los gases de escape son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrocarburos (HC) y el material particulado (PM).

Organizaciones gubernamentales han desarrollado regulaciones para establecer límites máximos permitidos de emisiones por los vehículos. Entre otras, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la Agencia de Protección Ambiental (EPA), la Agencia Europea del Medio Ambiente (EURO), la Junta de Recursos del Aire de California (CARB) y la Organización de las Naciones Unidas (ONU), a través de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y de sus diferentes organismos regionales, establecieron lineamientos para asegurar la calidad del aire. Ejemplo de esos lineamientos son el protocolo de Kioto y el acuerdo de París, que tienen por objetivo reducir el calentamiento global provocado por los gases de efecto invernadero.

Actualmente, existen tecnologías que controlan y reducen las emisiones contaminantes que emiten los motores de los vehículos de carretera. En este trabajo se presentan estas tecnologías y las tendencias tecnológicas dirigidas hacia el transporte limpio a través de la calidad del combustible, como es el caso del diésel de ultra bajo azufre. Así mismo, muestra las generalidades de la aplicación de regulaciones de emisiones de vehículos, incluyendo los límites máximos permitidos en México y en otros países.

En el capítulo 1 se presenta la historia de los vehículos y la historia del control de emisiones de motores gasolina y diésel. Se describe el proceso de generación de los gases en los motores de combustión interna y su efecto en el medio ambiente y en el ser humano. Además, se incluyen datos del incremento de las emisiones que contribuyen al efecto invernadero y el consumo energético en el país.

En el capítulo 2 se presenta la clasificación de emisiones contaminantes de los vehículos de carretera y la influencia de la mezcla aire-combustible en la producción de gases contaminantes. El capítulo 3 describe la situación de la implementación de legislaciones del control de emisiones contaminantes de los vehículos a nivel mundial. Al respecto, se consideran las normas relevantes en los países desarrollados y el proceso de adaptación de México respecto a la actualización de dichas normas.

En el capítulo 4 se presentan tecnologías aplicadas a la reducción de emisiones, que controlan la mezcla aire-combustible para obtener una combustión eficiente y las aplicadas en el tratamiento de gases. Se trata también su inclusión en la actualización de normas que restringen los límites de emisiones a los vehículos de carretera.

El capítulo 5 presenta comentarios de esta revisión, que recopila sugerencias y alternativas para mejorar la calidad del aire, las exigencias del usuario del vehículo a la industria automotriz y los beneficios que se tendrán si se cumplen las normas de emisiones, aplicadas adecuadamente a vehículos de carreteras.

# Introducción

---

La contaminación del aire que se produce en los países industrializados procede principalmente de los sistemas de transporte, de emisiones industriales y de emisiones que se generan en las ciudades o el campo; pero no se debe olvidar que siempre, al final, estas fuentes de contaminación dependen de la demanda de productos, energía y servicios que utiliza el conjunto de la sociedad. El transporte participa como el mayor generador de emisiones en México y el de mayor consumo de energía, las emisiones que emiten los vehículos que utilizan combustibles fósiles son un tema particularmente tratado por ser el producto de la combustión producida en los motores al generar la energía para producir el movimiento de los vehículos. Estos motores de combustión interna, que la mayoría emplea como combustible gasolina o diésel, emiten al ambiente diversos gases que alteran la composición natural y contribuyen, además, a reacciones químicas o físicas que deterioran la calidad del aire en el ambiente.

Para solucionar el problema de emisiones en los vehículos con motores de combustión interna, los gobiernos de algunos países han establecido leyes que limitan la cantidad de contaminantes que un vehículo puede generar, lo que obliga a la industria automotriz a buscar medios para hacer más eficientes y menos contaminantes sus motores. En la década de 1960, surgieron las primeras acciones por preservar la contaminación del aire. A partir de éstas, han surgido dos tendencias normativas importantes a nivel mundial, cuyo objetivo es reducir la contaminación del aire provocada por los vehículos de carretera.

Ante la necesidad actual de utilizar los motores de combustión interna, como parte de su evolución tecnológica, se han desarrollado diversas tecnologías con la pretensión de controlar y reducir la emisión de contaminantes. Algunos de estos desarrollos se aplican como elementos o sistemas que mejoran la combustión, mientras que otros se orientan al manejo o tratamiento posterior de los gases de escape. Ya sea que favorezcan o que apliquen un tratamiento a los gases nocivos de la combustión, algunas tecnologías pueden interactuar de manera combinada para mejorar el manejo de las emisiones contaminantes, sin reducir las mejoras de desempeño y rendimiento del motor.

Es el propósito de este estudio describir las legislaciones que establecen límites máximos de las emisiones provenientes de los vehículos de carretera y las tecnologías que han surgido para cumplir con cada una de estas legislaciones, considerando la adaptación de México en la actualización de las legislaciones internacionales, que permita establecer un criterio en la mejora de la calidad del aire.



# 1 Antecedentes

---

Actualmente, los vehículos son necesarios en la vida cotidiana para el traslado de bienes y personas; por tanto, es necesario conocer los problemas que existen en su uso, siendo relevantes temas sobre la seguridad vial, la protección a los ocupantes y la contaminación provocada por los gases de la combustión, entre otros. El vehículo impulsa la sociedad moderna, desde coches, locomotoras, barcos hasta aviones.

## 1.1 Historia de los vehículos automotores

Aunque la historia y evolución de motores y vehículos es bastante larga y compleja, aquí se resaltan algunos hechos relevantes. Éstos se muestran de manera cronológica.

En 1876, Nikolaus Otto construye el primer motor de combustión interna de cuatro tiempos utilizando, por cada carrera, un pistón.

En 1885, Carl Benz inventa el primer automóvil a gasolina, su patente marcó el comienzo del vehículo alimentado por un motor de combustión interna de 0,86 kW de potencia a 600 revoluciones por minuto (RPM), que alcanzaba una velocidad máxima de 18 km/h. Sin embargo, al principio la adquisición de un automóvil representaba un serio problema y la red de carreteras eran consideradas inexistentes. En los años que siguieron, la industria se expandió con la llegada de las empresas como Peugeot, Citroën, Renault, Fiat, Ford, Rolls-Royce, Austin y otros.

En 1897, la empresa Man presenta el primer motor a diésel para vehículos.

En 1910, se tuvo el mayor avance de la industria automotriz americana debido a la adopción de las líneas de producción y, por tanto, la fabricación de automóviles en serie. Con este avance tecnológico, introducido por Henry Ford, fue posible atender la creciente demanda de automóviles, bajar los costos de producción y hacer asequible un vehículo para casi cualquier persona. Estas condiciones dispararon de manera importante la cantidad de automóviles en circulación. Ford introdujo a la producción en línea el Ford T, el cual tenía una potencia de 15,7 kW a 1600 RPM y alcanzaba una velocidad máxima de 70 km/h.

En 1923, la empresa Benz-Man introducen el primer camión que utilizó diésel como fuente de energía.

En 1936, Daimler-Benz inauguran la producción de vehículos de pasajeros movidos por diésel.

En 1938, la empresa alemana Volkswagen presentó el VW Beetle de 17,3 kW, 3000 RPM y una velocidad máxima de 100 km/h.

En 1966, se desarrolló el primer sistema de inyección electrónica de combustible del fabricante Bosch, llamado D-Jetronic. La inyección de combustible se hacía mediante unos inyectores electromagnéticos accionados directamente por la centralita o unidad de control (ECU).

En 1985, aparece el primer catalizador catalítico diseñado para funcionar en combinación con el control de mezcla de ciclo cerrado, diseñado para usarse con combustible sin plomo.

La evolución tecnológica de los vehículos se enfocó desde sus inicios en conseguir que éstos fueran capaces de desarrollar mayores velocidades. Consecuentemente, hubo un aumento de los riesgos por accidentes, así como aumento de las emisiones provenientes de los vehículos (Bosch Automotive Professional, 2015).

## **1.2 Historia del control de emisiones vehiculares**

Al inicio del impulso de la industria automotriz no se consideró la peligrosidad que implica la generación de las emisiones que se producen por la combustión de los motores de los vehículos. Todo comenzó en la década de 1950 en Los Ángeles, California, en los Estados Unidos de América, cuando se incrementó la compra de vehículos para uso privado, donde las emisiones de los automóviles fueron un importante contribuyente a la contaminación del aire urbano. Los estándares de emisión de gases de escape para automóviles nuevos se establecieron por primera vez en 1968 (1965 en California) y, a partir de entonces, cada dos años los criterios de emisiones provenientes de la combustión se hicieron más estrictos hasta principios de los años ochenta. Estas condiciones llevaron a los fabricantes de motores a enfrentar continuamente grandes retos tecnológicos que les permitieran ajustarse a la legislación anticontaminante., lo que ha logrado incluir parámetros fundamentales en la evaluación del desempeño de los motores.

En los años 80, el parque vehicular estaba compuesto, en su mayoría, por vehículos de gasolina debido a la simplicidad tecnológica (encendido por chispa). Hasta esa fecha, el sistema de alimentación de combustible se basaba en la inyección mecánica, conocida como carburación, ya que los carburadores tenían la función de mezclar la gasolina con el aire para introducirla posteriormente en la cámara de combustión. Puesto que a finales de la década de los 80s y principios de los 90s se habían establecido estándares mucho más estrictos, especialmente en los Estados Unidos y Europa, la estrategia adoptada para minimizar el "smog" fue utilizar componentes electrónicos con el fin de conseguir un mayor control sobre el combustible. Los coches de gasolina se fabricaban con la admisión de combustible de inyección electrónica que, junto a una unidad de control del motor (ECU, por sus siglas en inglés), calculaba los parámetros necesarios para administrar la cantidad justa y necesaria de combustible a la cámara de combustión a través de inyectores. Con esa tecnología se alcanzó una reducción importante en las emisiones de

hidrocarburos (HC) sin quemar, aunque con reducciones menores en óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). La estrategia fue elegida en parte por la evaluación de la reacción fotoquímica de smog a los cambios en los HC y NO<sub>x</sub>, además de la viabilidad técnica de reducir los HC respecto a los NO<sub>x</sub>. Los estándares de emisiones para motores en vehículos de gasolina y diésel se han actualizado de manera constante, siendo más estrictos cada vez. Sobre esas fechas empezaba la moda diésel, un combustible que solo se usaba en vehículos pesados y que, debido a su bajo precio (la mitad que la gasolina) y mínimo consumo, suponía un gran atractivo para los compradores de coches nuevos (Academic Press, 1998).

### **1.3 Contaminación y calidad del aire**

El aire respirable está conformado aproximadamente del 78% de nitrógeno (N<sub>2</sub>), 21% de oxígeno (O<sub>2</sub>) y el restante 1% de pequeñas porciones de vapor de agua, dióxido de carbono y otros gases. Sin embargo, actividades humanas como la industrial, la doméstica, la comercial y el uso masivo del transporte, ocasionan la emisión de gases, humos, polvos y partículas que alteran su composición y provocan su contaminación, que además tienen serios impactos en el ambiente y en la salud de las personas, de los animales e incluso de la vegetación.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recurso Naturales (SEMARNAT), define la contaminación del aire como cualquier sustancia en él que, en alta concentración, puede dañar al hombre, animales, vegetales o materiales. Puede incluir casi cualquier compuesto natural o artificial de materia flotante susceptible de ser transportado por el aire. Estos contaminantes se encuentran en forma de partículas sólidas, gotas líquidas, gases o combinadas. Generalmente se clasifican en los emitidos directamente por la fuente contaminante, contaminantes primarios, y los secundarios, producidos en el aire por la interacción de dos o más contaminantes primarios o por la reacción con los compuestos normales de la atmósfera (SEMARNAT, 2017). La necesidad de los gobiernos locales y de la sociedad de establecer políticas de calidad del aire que limitan las concentraciones máximas permisibles de contaminantes, están dirigidas generalmente a proteger, en sentido amplio, la salud de las personas y los ecosistemas.

La presencia de contaminantes en la atmósfera puede, en algunos casos, percibirse con facilidad, particularmente por la reducción de la visibilidad en las grandes ciudades. Sin embargo, más allá de la percepción cualitativa, es necesario conocer cuantitativamente las concentraciones de los contaminantes que afectan la salud humana y el medio ambiente, como una medida de la calidad del aire que se tiene en determinada región.

Atendiendo a dicha necesidad, varias dependencias gubernamentales, entre ellas la SEMARNAT y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), realizan estudios y análisis de la calidad del aire en México. Una de sus emisiones es el Informe Nacional de Calidad del Aire a nivel de zona metropolitana y ciudad de México, con calificación de la calidad de aire como buena, regular o mala. Así mismo, permite conocer información detallada y actualizada sobre los límites

normados vigentes para cada contaminante según criterios en México, Estados Unidos y la Unión Europea, además de las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) ( INECC, 2017).

## **1.4 Tipos de emisiones contaminantes en la atmósfera**

La emisión es definida como la descarga directa o indirecta a la atmósfera de toda sustancia o energía, incluyendo, pero no limitándose, a olores, partículas, vapores, gases o cualquiera de sus combinaciones. También se refiere a la descarga de contaminantes a la atmósfera provenientes de chimeneas y otros conductos de escape de las áreas industriales, comerciales y residenciales, así como de los vehículos automotores, locomotoras o escapes de aeronaves y barcos (SEMARNAT, 2017).

Se denominan gases contaminantes primarios a aquellos que se emiten directamente a la atmósfera como resultado de un proceso de combustión. Estos pueden ser:

- Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>). Se forman por la combustión del azufre presente en el carbón y el petróleo. Los SO<sub>x</sub> forman con la humedad ambiente aerosoles, incrementando el poder corrosivo de la atmósfera, disminuyendo la visibilidad y provocando la lluvia ácida.
- Monóxido de carbono (CO). Es el contaminante más abundante en la capa inferior de la atmósfera. Se produce por la combustión incompleta de compuestos de carbono. Es un gas inestable que se oxida generando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Alrededor del 70 por ciento del CO provienen de los vehículos.
- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Se producen en la combustión de productos fósiles, destacando los vehículos, carbón y quemados de madera. La producción de fertilizantes y explosivos, tabaco y calderas generan emisiones importantes de NO<sub>x</sub>. El monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) requieren especial atención. El NO se oxida formando NO<sub>2</sub>, mientras que el NO<sub>2</sub> es precursor del esmog fotoquímico.
- Partículas. Es material respirable presente en la atmósfera en forma sólida o líquida (polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen, entre otras). De acuerdo con su tamaño se pueden dividir en dos grupos principales: las de diámetro aerodinámico igual o inferior a los 10 µm (PM<sub>10</sub>) y las de fracción respirable más pequeña (PM<sub>2,5</sub>).
- Hidrocarburos (HC). Las emisiones de HC están asociadas a la mala combustión de derivados del petróleo. Las fuentes más importantes de emisión son el transporte por carretera, los disolventes, pinturas, vertederos y la producción de energía. Los de mayor interés son los compuestos

orgánicos volátiles (COV), dioxinas, furanos, bifenilos policlorados (PCB) y los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH).

Se denominan gases contaminantes secundarios aquellos que, una vez lanzados a la atmósfera, pueden reaccionar con otros contaminantes con igual toxicidad, como son:

- Ozono (O<sub>3</sub>). El ozono en particular es un contaminante que se forma por acción de la luz solar y las reacciones fotoquímicas que involucran a los compuestos orgánicos volátiles (compuestos orgánicos que contienen carbón combinado con otros elementos, comúnmente hidrógeno, oxígeno y nitrógeno) y los óxidos de nitrógeno, provenientes en un alto porcentaje de los automotores. El ozono forma parte de la composición de la atmósfera; sin embargo, a baja altura (O<sub>3</sub> troposférico) resulta perjudicial por su carácter oxidante, reactivo, corrosivo y tóxico, por lo que reacciona con rapidez generando compuestos secundarios.
- Lluvia ácida. Es el término que se ha usado para describir el proceso por el cual ciertos ácidos se forman en la atmósfera a partir de contaminantes y luego se precipitan a la tierra. El SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre) y los NO<sub>x</sub>, causan la lluvia ácida. Estas sustancias en presencia de agua, O<sub>2</sub> y otros compuestos químicos, forman ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) respectivamente, que se precipitan a la tierra en forma líquida cuando se presentan lluvias o en forma seca en presencia de nevadas o neblinas. El pH de la lluvia normal es de alrededor de 6, mientras que la lluvia ácida presenta un pH menor a 5.
- Contaminación fotoquímica. La constituyen la luz solar y sustancias susceptibles de ser oxidadas. El smog fotoquímico es una mezcla de contaminantes que se forman por reacciones producidas por la luz solar al incidir sobre los contaminantes primarios, como son los óxidos de nitrógeno y compuestos volátiles procedentes del escape de los vehículos. (SEMARNAT, 2013)

### **1.4.1 Clasificación de los gases que provocan la contaminación del aire**

La problemática de la contaminación del aire se ha convertido en problema a nivel mundial, lo que ha causado problemas de salud a la población y a los ecosistemas, como la destrucción de la capa de ozono, el efecto invernadero y el cambio climático. De los diversos contaminantes, se presenta a continuación cada uno con su efecto en la sociedad:

*Contaminantes criterio:* Son los que afectan a la salud humana y los ecosistemas, tales como Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>), Partículas (PM<sub>10</sub> y PM<sub>25</sub>), Monóxido de Carbono (CO) y Plomo (Pb), (SEMARNAT, 2017).

*Contaminantes de vida corta:* Son compuestos que permanecen por un tiempo relativamente corto en la atmósfera, desde un par de días hasta unas décadas, que tienen un efecto de calentamiento, a corto plazo, sobre el clima. Generan millones de pérdidas anuales de toneladas de cosechas al año y producen efectos nocivos en la salud humana y la de los ecosistemas. Los principales causantes son el Ozono troposférico (O<sub>3</sub>), Carbón Negro (CN), Metano (CH<sub>4</sub>) y los Hidrofluorocarbonos (HFC).

*Contaminantes de efecto invernadero:* Son los que reciben su nombre porque provocan el efecto invernadero. De manera semejante en que las paredes de vidrio elevan la temperatura interior de los invernaderos, del mismo modo éstos conducen al aumento de la temperatura de la tierra al interactuar con la energía que proviene del sol.

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), define a los gases de efecto invernadero como el componente gaseoso de la atmósfera, ya sea de origen natural o antropogénico, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja térmica emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad da lugar al efecto invernadero.

Los principales gases responsables del efecto invernadero natural son:

- El bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) generado a partir de cualquier combustión, puede ser de la respiración de los seres vivos, la descomposición de la materia orgánica muerta, los incendios naturales
- El metano (CH<sub>4</sub>) emitido por los humedales y los rumiantes durante su proceso digestivo
- El óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) producido por la descomposición bacteriana de la materia orgánica
- El ozono (O<sub>3</sub>) cuando resulta de la unión natural de tres átomos de oxígeno
- El vapor de agua (H<sub>2</sub>O) producido por la evaporación del agua

Después del bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), los más importantes contribuyentes al calentamiento global actual son los contaminantes climáticos de vida corta: el metano (CH<sub>4</sub>), el carbono negro (CN) y el ozono troposférico (O<sub>3</sub>), (INECC, 2018).

## **1.4.2 Efectos de los gases contaminantes en el ser humano**

La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud, bien sea en los países desarrollados o en los países en desarrollo. Se estima que la contaminación ambiental del aire, tanto en las ciudades como en las zonas

rurales, fue causa de 4,2 millones de muertes prematuras en todo el mundo por año. Esta mortalidad se debe a la exposición a partículas pequeñas de 2,5 micrones o menos de diámetro (PM2.5), que producen enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer. La OMS estima que, en 2016, aproximadamente el 58% de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación atmosférica se debió a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, mientras que el 18% de las muertes tuvo como causas la enfermedad pulmonar obstructiva crónica e infecciones respiratorias agudas. El 6% de las muertes se debió al cáncer de pulmón.

Algunas muertes pueden atribuirse a más de un factor de riesgo al mismo tiempo. Por ejemplo, tanto el consumo de tabaco como la contaminación del aire ambiente pueden provocar cáncer de pulmón. Algunas de las muertes por este padecimiento podrían haberse evitado con la mejora de la calidad del aire ambiente o con la reducción del consumo de tabaco. Una evaluación de 2013 realizada por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer de la OMS, determinó que la contaminación del aire exterior es carcinógena para el ser humano y que las partículas del aire contaminado están estrechamente relacionadas con la creciente incidencia del cáncer, especialmente el cáncer de pulmón. También se ha observado una relación entre la contaminación del aire exterior y el aumento del cáncer de vías urinarias y vejiga. Por tanto, existen numerosos ejemplos de políticas relativas a los sectores que permiten reducir la contaminación del aire: (Organización Mundial de la Salud, 2018):

- Industria
- Energía
- Transporte
- Planificación urbana
- Generación de electricidad
- Gestión de desechos municipales y agrícolas

Los principales contaminantes que afectan a la salud humana y a los ecosistemas son denominados contaminantes criterio. Emisiones provenientes de los vehículos automotores contribuyen en el deterioro de la salud, como resultado de la exposición al ozono troposférico, monóxido de carbono, las partículas y compuestos tóxicos en el aire. El efecto de los gases contaminantes criterio en la salud humana pueden ser como sigue:

**Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>):** Irrita las vías respiratorias. En altas concentraciones puede provocar bronquitis y traqueítis.

**Monóxido de carbono (CO):** En altas concentraciones inhabilita el transporte de oxígeno hacia las células. Si se expone prolongadamente puede provocar mareo, dolor de cabeza, inconciencia e, incluso, la muerte.

**Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>):** Irrita las vías respiratorias. En altas concentraciones puede provocar bronquitis y neumonía.

Ozono (O<sub>3</sub>): Irrita las vías respiratorias. En altas concentraciones reduce la función pulmonar, empeora el asma, inflama las células que recubren los pulmones y empeora enfermedades pulmonares crónicas.

Partículas PM<sub>10</sub>: Agravan el asma y enfermedades respiratorias cardiovasculares. Su exposición crónica en altas concentraciones puede provocar un incremento en el riesgo de morbilidad y mortalidad.

Partículas PM<sub>2.5</sub>: Agravan el asma, reducen la función pulmonar y se asocian con el desarrollo de diabetes. Pueden ocasionar disminución en el tamaño del feto.

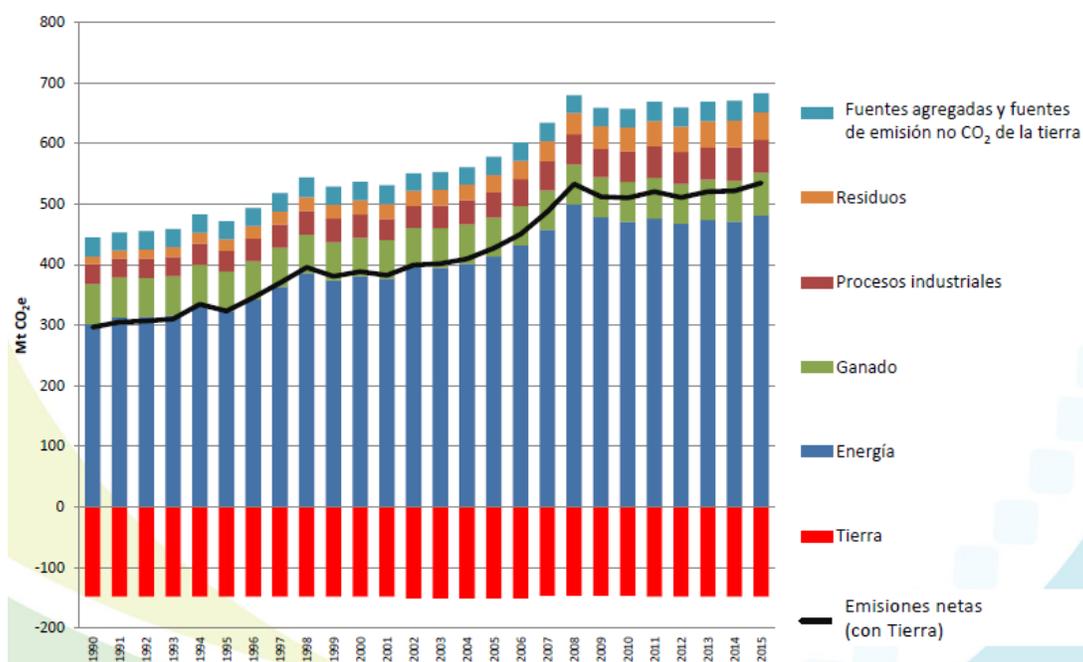
Smog fotoquímico: Reduce la visibilidad, irritando los ojos y el aparato respiratorio; puede causar cáncer de pulmón en la misma medida, incluso mayor, que lo puede hacer el fumar. El esmog también afecta a árboles y cultivos (SEMARNAT, 2013).

## **1.5 Registro de emisiones de gases de efecto invernadero**

El incremento de población y de las actividades humanas ha tenido un fuerte impacto en la calidad de aire debido a las emisiones al medio ambiente, constituyendo un problema a nivel mundial que, en México, se ha incrementado significativamente a través de los años. El INECC analiza el incremento de las emisiones y ha presentado información de las tendencias por sector y por emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

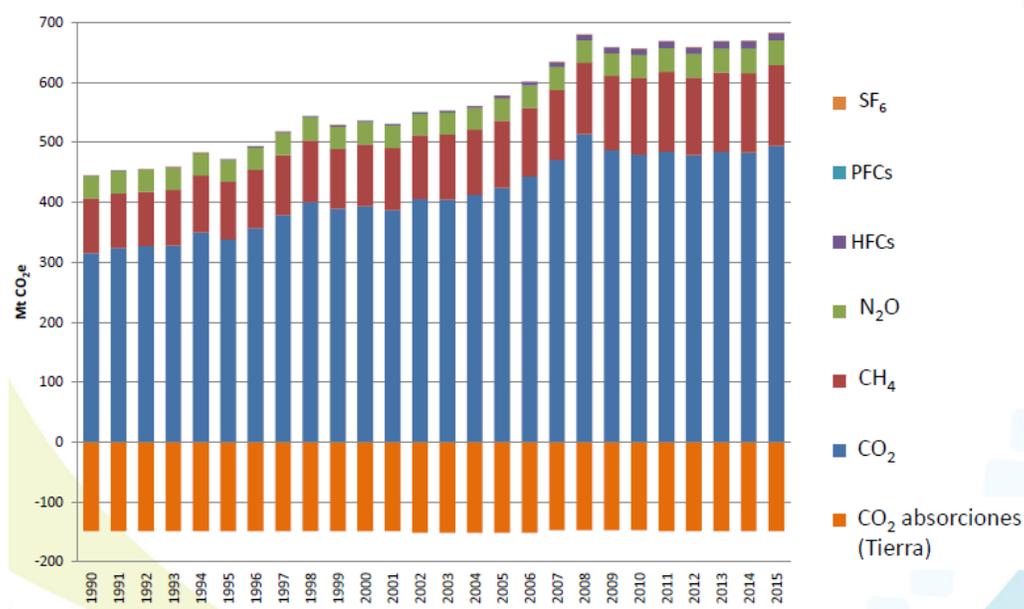
En la Figura 1.1 se presenta la tabla de la tendencia de las emisiones por sector, mientras que en la Figura 1.2 se muestra por tipo de GEI, de 1990 a 2015. Los sectores son Energía, Ganado, Procesos industriales, Residuos y Fuentes agregadas de emisión no CO<sub>2</sub> de la tierra y las emisiones en la tierra, es decir, las emisiones que absorbe la tierra. En ambas tablas se expresan los resultados en megatoneladas (Mt) de bióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e), lo que se refiere a la unidad de medición usada para indicar el potencial de calentamiento global de cada uno de los gases de efecto invernadero respecto al dióxido de carbono.

Respecto a la primera tabla se muestra que el sector que más emite es el de Energía, pues en el año 2015 se registraron 683 Mt de GEI, el sector energía contribuyó con el 70%, seguido por el Ganado con un 10%, Procesos industriales con el 8%, Residuos con 7% y Fuentes agregadas y fuentes de emisión no CO<sub>2</sub> de la tierra con 5%. En ese año, se emitió el 71% de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el 21% de metano (CH<sub>4</sub>), el 6% de óxido nítrico (N<sub>2</sub>O), el 1,8% de hidrofluorocarbonos y menos del 1% de hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), (INECC, 2018).



Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2018)

**Figura 1.1 Emisiones por sector en México**

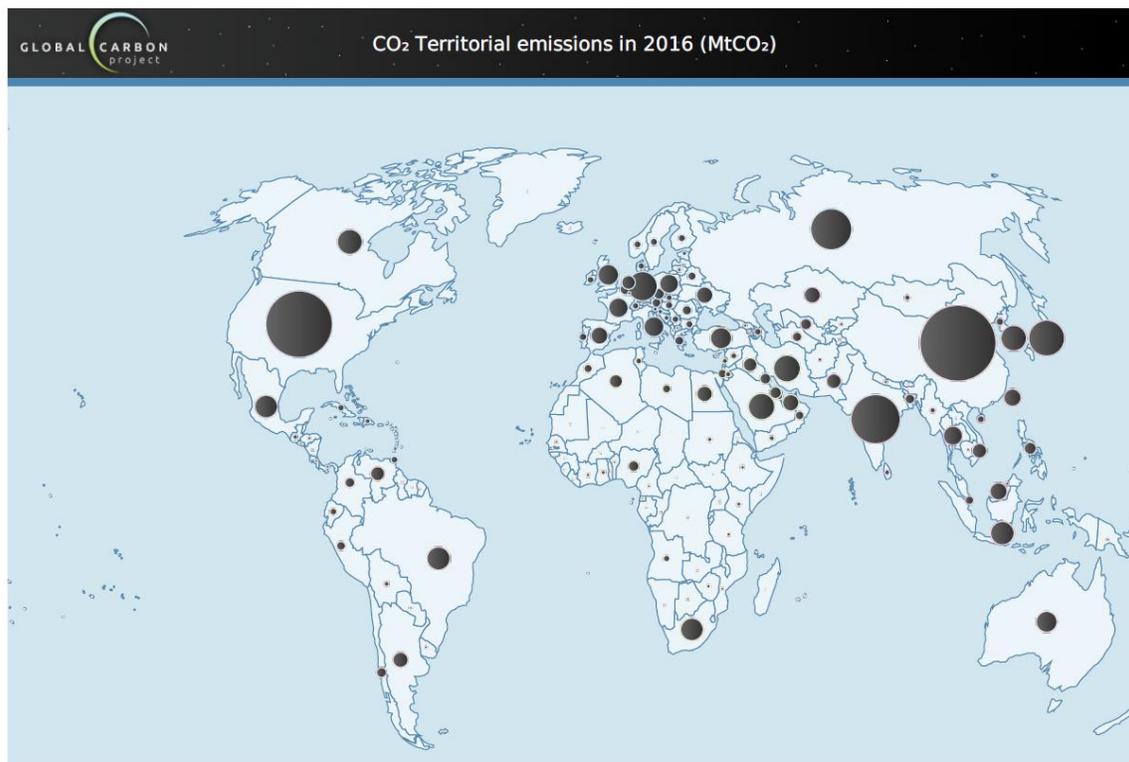


Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2018)

**Figura 1.2 Tendencia de las emisiones por tipo de gas**

Para conocer las emisiones en cada país se utilizó la plataforma web del Atlas del Carbono Global (*Global Carbon Atlas*), que presenta el banco de datos y realiza la divulgación de las emisiones de carbono en el desarrollo humano a nivel mundial. El Atlas ilustra y presenta los datos de las emisiones de bióxido de carbono

producidas por la quema de combustibles fósiles, la producción de cemento y cambios en los usos del suelo sobre múltiples décadas. La información está disponible a nivel global, regional y nacional con herramientas que permiten comparar, clasificar y visualizar los cambios a través del tiempo. La última información presentada fue para el 2016, que se representa en la Figura 1.3 a través de un mapa que esquematiza la producción de CO<sub>2</sub> por país, generando un total de 36183 Mt.



Fuente: Global Carbon (Global Carbon Atlas, 2017)

### Figura 1.3 Producción de bióxido de carbono por país

En la Tabla 1.1 se enlistan los 30 primeros países que generan CO<sub>2</sub>, expresado los resultados en MtCO<sub>2</sub>, según el Atlas del Carbón Global, (*Global Carbon Atlas*, 2017).

**Tabla 1.1 Emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas por país**

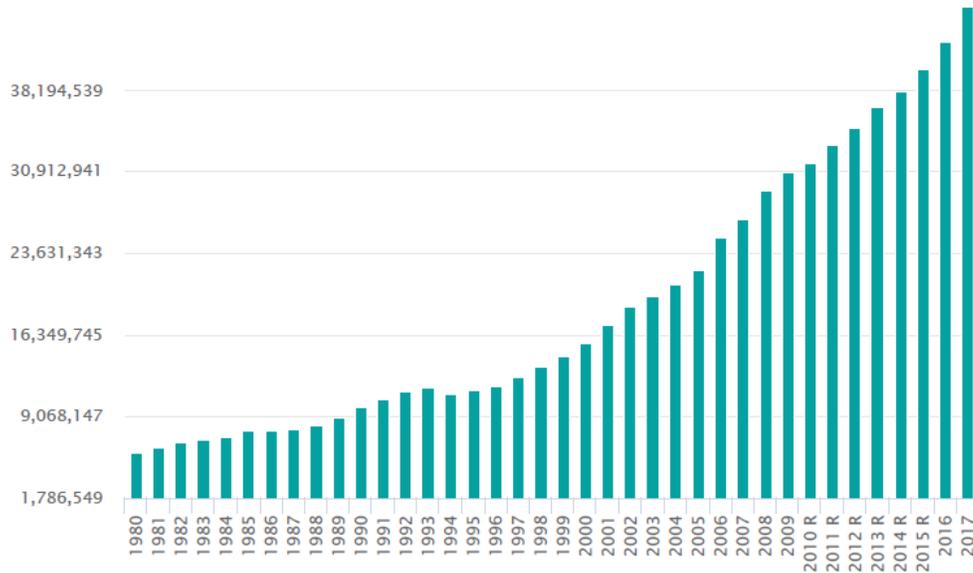
No.	País	MtCO <sub>2</sub>	No.	País	MtCO <sub>2</sub>
1	China	9839	16	Australia	413
2	Estados Unidos de América	5270	17	Reino Unido	385
3	India	2467	18	Francia	356
4	Rusia	1693	19	Italia	356
5	Japón	1205	20	Tailandia	331
6	Alemania	799	21	Polonia	327
7	Irán	672	2	Kazajstán	293
8	Arabia Saudita	635	23	España	281
9	Corea del Sur	616	24	Taiwán	272
10	Canadá	573	25	Malasia	255
11	México	490	26	Emiratos Árabes	232
12	Indonesia	487	27	Egipto	219
13	Brasil	476	28	Ucrania	212
14	Sur África	456	29	Argentina	204
15	Turquía	448	30	Vietnam	199

Fuente: Global Carbon (Global Carbon Atlas, 2017)

## 1.6 Parque vehicular en México

Un fenómeno importante que ha tenido México es su crecimiento poblacional, siendo un total de 119,938,473 hasta el año 2015, lo que incrementó la actividad industrial y el parque vehicular. Este último alcanzó los 45,476,133 unidades vehiculares registradas en circulación hasta 2017, según lo reportado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), como se aprecia en la Figura 1.4. Del total de vehículos automotores registrados el 67% corresponde a automóviles, el 24% a camiones y camionetas de carga, el 8% a motociclistas y el 1% a camiones para pasajeros.

El incremento de vehículos en circulación, aunque contribuye al crecimiento económico del país, ha producido también mayor contaminación al medio ambiente, principalmente al agua, el suelo y la atmósfera, constituyendo un grave problema de riesgo de salud y daño ambiental que enfrenta la sociedad actualmente. Este problema incrementa por el rápido aumento del parque vehicular, la actividad industrial y la prestación de servicios que demandan, en conjunto, grandes cantidades de energía proveniente de combustibles fósiles, generando, en consecuencia, un volumen importante de emisiones de efecto invernadero y contaminantes. En este contexto, otro indicador particular de la posible evolución en la calidad del aire lo constituye el consumo de energéticos acotados a una determinada región (INEGI, 2018).



Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018)

**Figura 1.4 Crecimiento del parque vehicular en México**

## 1.7 Consumo energético en México por el autotransporte

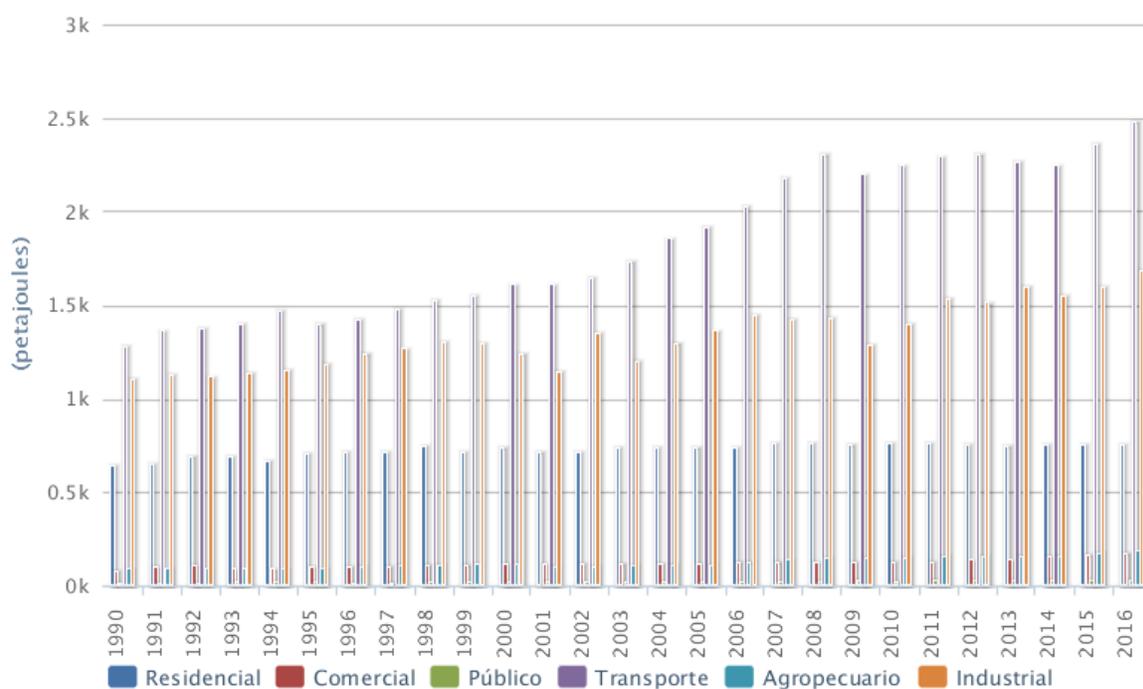
El balance nacional de energía proporciona información del consumo final energético total por sector residencial, comercial, público, industrial, transporte y agropecuario, como se muestra en la Figura 1.5.

De acuerdo a la información de la Secretaría de Energía (SENER), sobre las estadísticas del Balance Nacional de Energía y del Consumo final, México ha incrementado el consumo energético en las últimas décadas. El sector energía alcanzó en el 2016 un consumo de 2485 PJ (petajoules), siendo el sector transporte el de mayor consumo con el 47%, seguido por el industrial con el 32%, el residencial con el 14%, el comercial y agropecuario similares con un 3% y, finalmente, el público con un 1%.

Respecto al comportamiento del sector transporte, éste aporta una relación entre el consumo de combustibles, el volumen de emisión de contaminantes y la calidad del aire en determinada región. La Figura 1.6 muestra gráficamente el incremento del consumo energético por tipo de transporte de 1990 a 2016. Tomando de referencia el 2016, se observa que el autotransporte consumió el 91%, mientras que el aéreo representa el 7% y el marítimo y el ferroviario cada uno con el 1%.

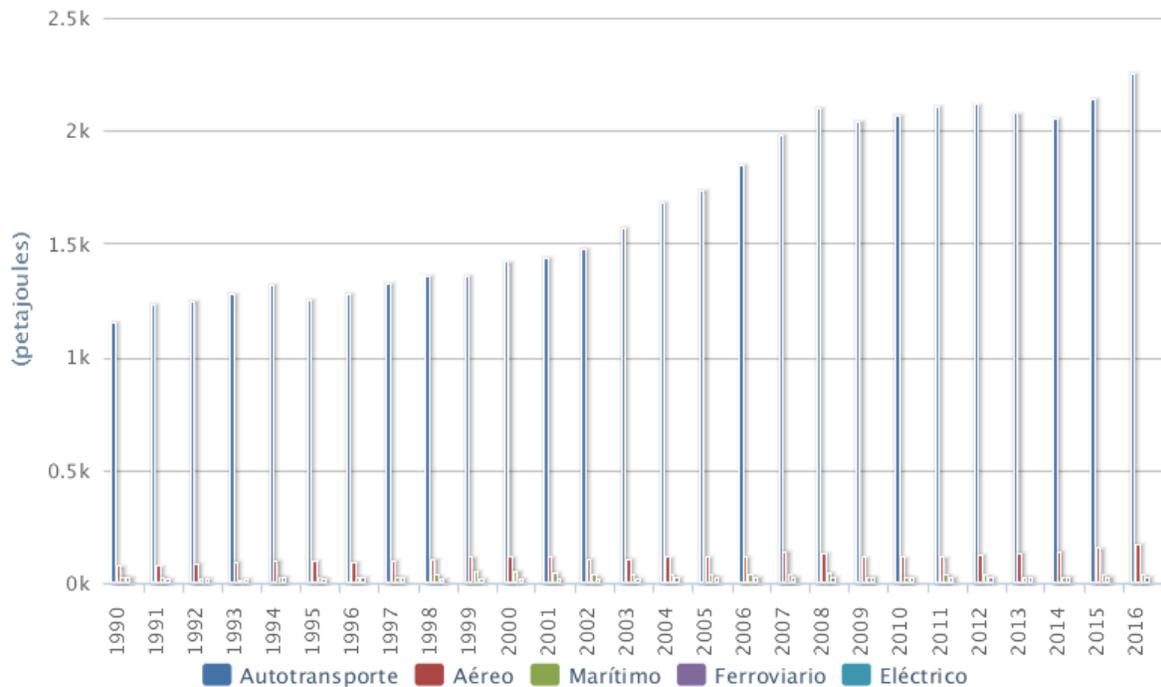
Otro indicador importante de las emisiones al aire es el tipo de combustible utilizado como fuente de energía en el sector transporte pues, en gran medida, los contaminantes emitidos a la atmósfera son el resultado de la combustión de combustibles fósiles. De acuerdo a La SENER, el consumo de combustibles en

2016 fue un 3% de gas licuado, 72% de gasolinas y naftas y 25% de diésel, que se presenta en cantidades absolutas en la Figura 1.7, con consumo expresado en petajoules. Se desprende de ahí que en las últimas décadas los combustibles más utilizados para vehículos de carretera son gasolinas y diésel (Sistema de Información Energética-SENER, 2018).



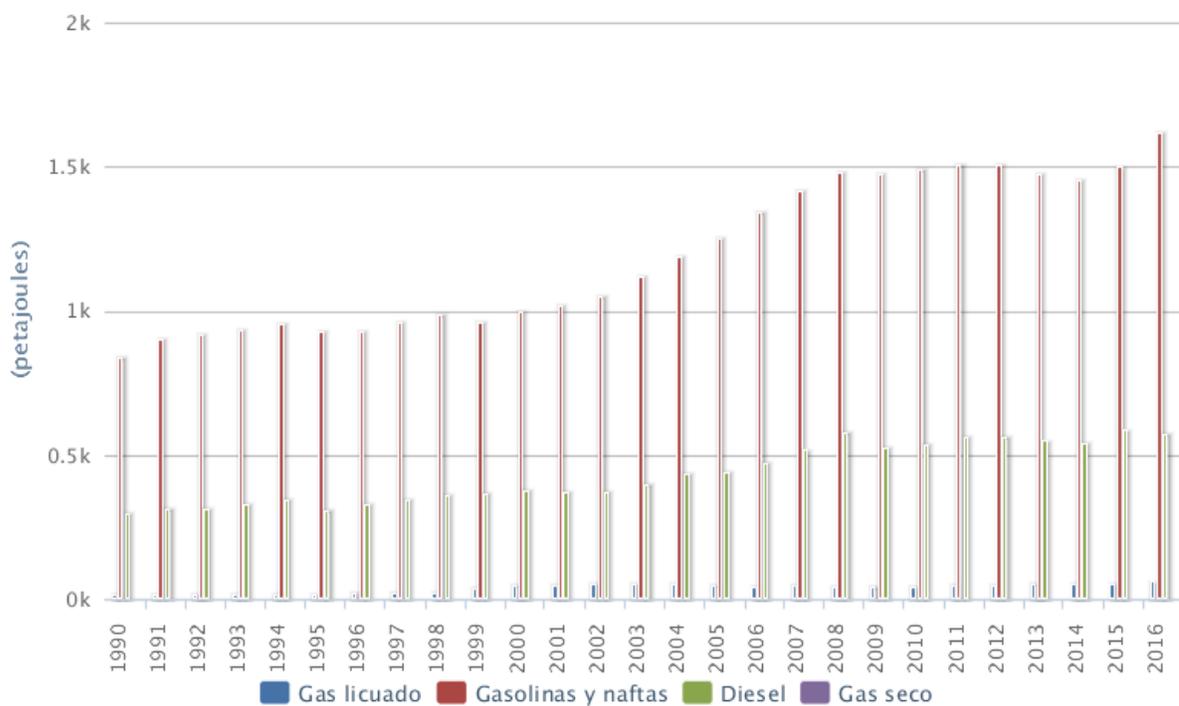
Fuente: Secretaría de Energía (Sistema de Información Energética-SENER, 2018)

**Figura 1.5 Consumo energético final por sector (Fuente: SENER)**



Fuente: Secretaría de Energía (Sistema de Información Energética-SENER, 2018)

**Figura 1.6 Consumo energético final tipo de transporte**



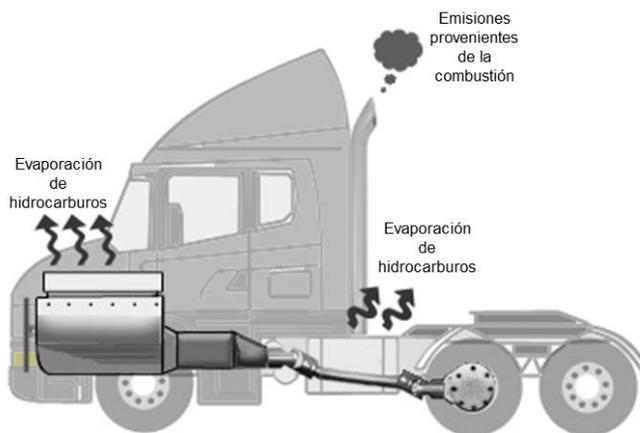
Fuente: Secretaría de Energía (Sistema de Información Energética-SENER, 2018)

**Figura 1.7 Consumo de combustible por tipo de transporte**

## 2 Emisiones contaminantes producidas por los vehículos de carretera

---

Los vehículos automotores propulsados por motores de combustión interna (MCI) producen tres tipos de emisiones de gases contaminantes: emisiones evaporativas, emisiones de la combustión y emisiones de partículas por desgaste, como se indica en la Figura 2.1. Las primeras corresponden a las que produce el motor por evaporación de hidrocarburos, aceite o refrigerante en sus propios tanques de depósito, mientras que las de combustión, las más comunes, son las emitidas por el tubo de escape como resultado de la combustión del combustible. Las últimas, de partículas de desgaste, se generan cuando el vehículo se detiene bruscamente; es decir, cuando las pastillas de freno presionan el disco y las ruedas se bloquean, produciendo un gas formado por partículas o humo.



Fuente: Elaboración propia IMT

**Figura 2.1 Emisiones en vehículos de carretera**

### 2.1 Emisiones evaporativas

Las emisiones evaporativas en los vehículos son vapores de hidrocarburos que, por efecto de la temperatura ambiental, la presión y la altitud, resultan de la volatilización y se dispersan en el aire, siendo un elemento muy contaminante de efecto invernadero. Su evaporación se produce principalmente en el tanque del combustible y en el motor, tanto cuando el vehículo se encuentra en circulación como en reposo. De no tener un sistema que permita aliviar la presión generada por la volatilización, el depósito podría tener problemas de seguridad, por lo que estos vapores se liberan por una válvula de alivio directamente a la atmósfera.

Las principales causas de la evaporación de HC es cuando se apaga el motor, pues debido al calor residual, se evapora el combustible en el sistema de alimentación del motor, así como por fugas de combustible, como líquido o vapor, que se presentan mientras el vehículo está en funcionamiento. Cuando la temperatura ambiente aumenta, el combustible en el tanque del vehículo se vaporiza y provoca un incremento de presión, que durante el proceso de recarga de combustible son expulsados al ambiente. De aquí las recomendaciones de recargar combustible cuando la temperatura ambiente es baja, (Gómez, 2009).

## **2.2 Emisiones provenientes del tubo de escape**

Las emisiones en el tubo de escape son producto de la combustión en el motor y tratados por el catalizador u otros componentes para reducir las emisiones contaminantes y tóxicas. La quema del combustible comprende una serie de contaminantes, como el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos (HC), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y las partículas (PM), además de ciertos contaminantes presentes en el combustible, como el azufre.

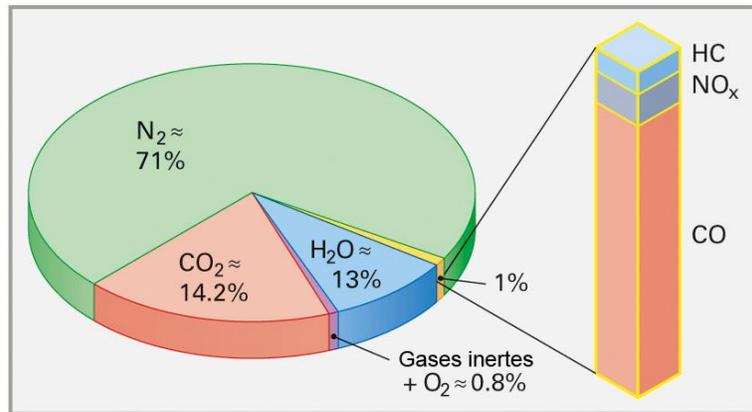
Las emisiones por el tubo de escape dependen de las características del vehículo, su tecnología y sistema de control de emisiones. Los vehículos pesados tienden a utilizar motores a diésel, los cuales generan mayores emisiones de NO<sub>x</sub>. Por otro lado, las normas que regulan la construcción de vehículos determinan su tecnología y la presencia o ausencia de equipos de control de emisiones. El estado de mantenimiento del vehículo y los factores operativos, la velocidad de circulación, la frecuencia e intensidad de las aceleraciones y las características del combustible (como su contenido de azufre), juegan un papel determinante en las emisiones por el escape.

Los componentes principales de los gases de escape son nitrógeno (N<sub>2</sub>), bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O), que no son venenosos. Un componente secundario es el CO, un gas incoloro, inodoro e insípido que se produce en alta tasa en ralentí en los motores Otto; por esta razón no es recomendable tener en marcha los motores en lugares cerrados. Otro componente secundario es el monóxido de nitrógeno (NO), que es un gas incoloro, inodoro e insípido y que expuesto al aire se transforma lentamente en NO<sub>2</sub>, el cual tiene un color pardo-rojizo.

Los hidrocarburos están contenidos en los gases de escape en mayor proporción. En presencia de óxidos de nitrógeno y a la luz del sol, forman oxidantes que irritan las mucosas, por lo que algunos hidrocarburos son considerados cancerígenos. Las partículas comprenden a todo el material (excepto agua no combinada) que, en condiciones normales, está contenido como cuerpo sólido (cenizas, carbono) o líquido en los gases de escape.

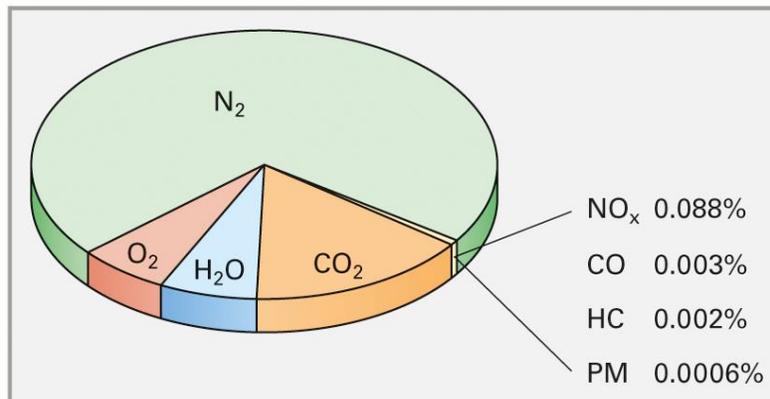
En la Figura 2.2 se presenta la composición de los gases de escape de los motores a gasolina, expresados en porcentaje. En expresión similar, la Figura 2.3 presenta la correspondiente a un motor a diésel, que exhibe una gran cantidad de nitrógeno,

dióxido de carbono, vapor de agua y oxígeno y una pequeña porción de gases contaminantes.



Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

**Figura 2.2 Composición de los gases de escape de un motor a gasolina**



Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

**Figura 2.3 Composición de los gases de escape de un motor a gasolina**

## 2.2.1 Emisiones en motores a gasolina

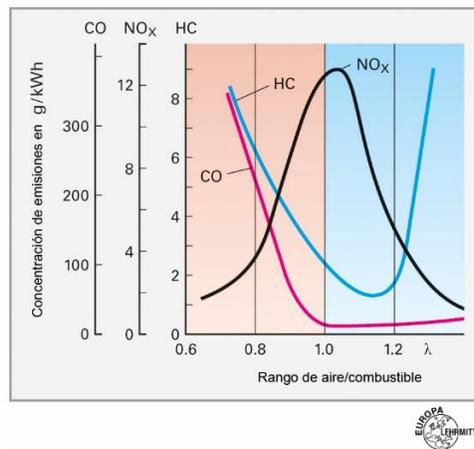
Los motores Otto trabajan con la mezcla aire combustible hasta el inicio de la combustión durante más tiempo que los motores diésel, consiguiendo una mezcla homogénea. Además, su operación varía en el campo de proporciones estequiométricas ( $\lambda=1$ ). Para lograr una óptima combustión es necesario que por cada 1 kg de masa de combustible se necesita 14.7 kg de masa de aire o, expresado en volumen, un litro de combustible necesita, para ser quemado completamente, cerca de 9500 litros de aire.

El factor de exceso de aire  $\lambda$  (Lambda) muestra cuánto es lo que difiere la razón de la mezcla de aire-combustible en la operación del motor, en comparación a la

necesaria teóricamente (14.7:1) para motores a gasolina.  $\lambda$  significa la relación de la masa de aire y combustible que es suministrada a la cámara de combustión; es decir, dicha propagación garantiza la mezcla estequiométrica, en donde se quema todo el combustible y se generan emisiones que se pueden reducir fácilmente.

La Figura 2.4 muestra la formación de las emisiones contaminantes, de acuerdo con la mezcla estequiométrica en los motores que utilizan gasolina como combustible. En ésta se observa la producción de emisiones de HC, CO, y  $\text{NO}_x$ , respecto a lambda, donde:

- $\lambda = 1$ : La masa de aire suministrada correspondiente a la masa de aire teóricamente necesaria.
- $\lambda < 1$ : Hay deficiencia en el suministro de aire; por lo tanto, se tiene una mezcla rica en combustible. En este punto se obtiene la máxima potencia de salida, con  $\lambda=0.85$  a  $0.95$ , donde se genera mayor cantidad de HC y CO.
- $\lambda > 1$ : Hay un exceso de aire o, bien, la mezcla es pobre en combustible en este rango. El exceso en el factor de aire se caracteriza por reducir el consumo de combustible y, a su vez, la potencia de salida. El máximo valor que  $\lambda$  puede obtener, llamado "límite de combustión pobre", depende del diseño del motor. Los valores adecuados varían de  $\lambda= 1.1$  a  $1.2$ ; por tanto, se generan mayores emisiones de  $\text{NO}_x$ .

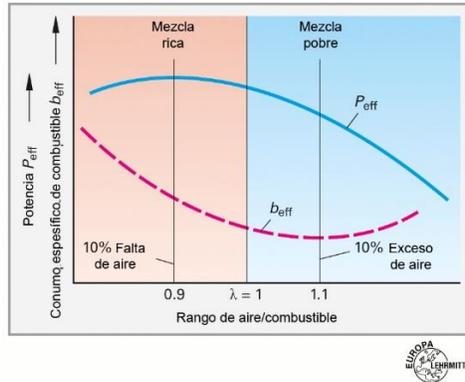


Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

### Figura 2.4 Emisiones formadas de acuerdo al factor exceso de aire

Durante la combustión se generan una serie de gases cuando el motor se encuentra en operación con  $\lambda=1$ . La proporción de estos productos en el motor no se tratan sino hasta llegar a los componentes que los reducen, siendo los catalizadores los más utilizados. Los gases que comúnmente se generan son el CO, los HC y los  $\text{NO}_x$  con el motor en operación y, a temperatura normal de funcionamiento, los convertidores catalíticos pueden convertir estos contaminantes a una tasa de más del 99% en sustancias inofensivas.

Los motores de encendido o ignición por chispa con inyección múltiple logran su potencia de salida máxima o pico con una deficiencia de aire de 5 a 15% ( $\lambda=0.95\dots0.85$ ). Por otro lado, un bajo consumo de combustible y exceso de aire es entre 10 a 20% ( $\lambda=1.1$  a 1.2). Ver Figura 2.5.



Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

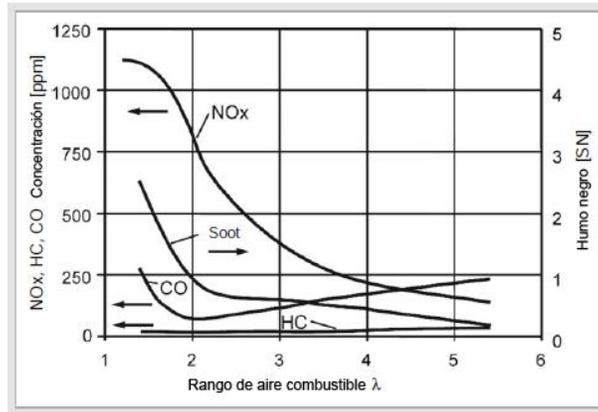
**Figura 2.5 Potencia y consumo específico de combustible en relación a la cantidad aire combustible**

El coeficiente  $\lambda$  de la mezcla aire-combustible suministrado al motor tiene un efecto dominante en la composición del gas de escape. El motor produce su par máximo a aproximadamente  $\lambda=0.9$ ; por lo tanto, esta relación generalmente se programa para la operación a plena carga. Para un consumo de combustible favorable se considera que  $\lambda=1.1$ , siendo aproximadamente el óptimo. Esto coincide con la fijación de bajas emisiones de CO y HC; pero no con los NO<sub>x</sub>, ya que están en su máximo nivel en esta relación. El factor de aire de  $\lambda=0.9$  a 1.05 se selecciona en ralentí. Si se regula la mezcla pobre se alcanza el límite de funcionamiento del motor y al seguir funcionando en mezcla rica se incrementan las emisiones de HC y CO. El control preciso de la mezcla se logra mediante el uso de sistemas electrónicos de inyección de combustible (EFI).

## 2.2.2 Emisiones en motores a diésel

El motor diésel, con un proceso de combustión totalmente distinto, funciona siempre con exceso de aire en una proporción de por lo menos 30% ( $\lambda =1.3$ ) superior a la relación estequiométrica correcta ( $\lambda=1$ ), que es usual en los motores de encendido por chispa. Los motores diésel pueden alcanzar hasta 18 veces mayor de combustible ( $\lambda=18$ ), lo cual proporciona una extrema reducción de HC, CO y NO<sub>x</sub>. La disminución de CO y de HC ocurre debido a que el exceso de aire aumenta la probabilidad de que las moléculas de combustible encuentren el oxígeno necesario para su completa quema. Ese mismo aire consume parte del calor generado en el interior de la cámara de combustión, reduciendo la producción de NO<sub>x</sub>. Sin embargo, debido a las altas temperaturas por la combustión, el O<sub>2</sub> reacciona con el N<sub>2</sub> formando NO<sub>x</sub>, (Europa Lehrmittel, 2014).

En la Figura 2.6 se muestra las curvas de generación de emisiones de un motor a diésel. En ella se observa que el rango de operación de lambda de un motor diésel es mayor al de uno de gasolina ( $\lambda \gg 1$ ), por tanto, los motores diésel presentan un índice menor de emisión de gases contaminantes, con mayor economía de operación, par y potencia.



Fuente: Imágenes extraídas del libro Handbook of diesel engines, (Robert Bosch, 2010).

### Figura 2.6 Emisiones generadas de acuerdo con el factor exceso de aire

El principal problema que presentan los motores diésel, en el uso de exceso de aire, es la generación de óxidos de nitrógeno. Éstos se generan cuando el nitrógeno y el oxígeno reaccionan a altas temperaturas, por lo regular mayores a 1200 °C, siendo un gas tóxico para el ser humano que, además, se puede combinar con el vapor de agua produciendo ácido nitroso ( $\text{NHO}_2$ ) o ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ).

En la Tabla 2.1 se presenta la composición y la temperatura de los gases de escape del motor diésel. Las unidades se expresan dependiendo del tipo de gas, algunos en partes por millón (ppm), otros en porcentaje de volumen (%vol) y la temperatura de los gases en grados centígrados (°C) (Robert Bosch, 2000).

**Tabla 2.1 Composición y temperatura de los gases de escape de motores diésel**

Composición y temperatura en los gases de escape		Ralentí	A potencia máxima
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	ppm	50...200	600...2500
Hidrocarburos (HC)	ppm C1	50...500	<50
Monóxido de Carbono (CO)	ppm	100...450	350...2000
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	Vol.%	...3.5	12...16
Vapor de Agua	Vol.%	2...4	...11
Oxígeno	Vol.%	18	2...11
Nitrógeno, etc.	Vol.%	Residual	Residual
Cantidad de Humo, auto de pasajeros		SZ≈<0.5	SZ≈2...3
Temperatura de gases de escape	°C	100...200	550...750

Fuente: Libro Automotive Hanbook (Robert Bosch, 2000)

### 3 Normatividad de emisiones para vehículos de carretera

---

Las normas de emisiones vehiculares son un conjunto de requisitos que regulan los límites aceptables de emisiones de gases en el escape de los vehículos de combustión interna. Éstas son cada vez más restrictivas y deben implementarse en los vehículos en circulación y para los productores de vehículos de carretera propulsados por combustibles fósiles.

El primer país en establecer medidas para mitigar la contaminación generada por los vehículos con motor de combustión interna fue Estados Unidos en 1963. Con la implementación del Acta del Aire Limpio (*Clean Air Act*, CAA), ordenó adoptar estándares de control de la calidad del aire a nivel mundial. Como consecuencia de esta ley, la Agencia de Protección Ambiental (EPA), desarrolló y estableció medidas para proteger la salud de la población expuesta a los contaminantes presentes en el aire. A través los años, estas regulaciones se han hecho progresivamente más estrictas hasta la actualidad. Los países que han tenido una importante aportación en la legislación del control de emisiones han sido Estados Unidos de América (EUA) y la Unión Europea (UE). La Organización de las Naciones Unidas ha exigido la adopción de normativas exigentes a los demás países, debido a que el incremento de las emisiones que contaminan el aire causa enfermedades en los seres humanos y provocan el cambio climático.

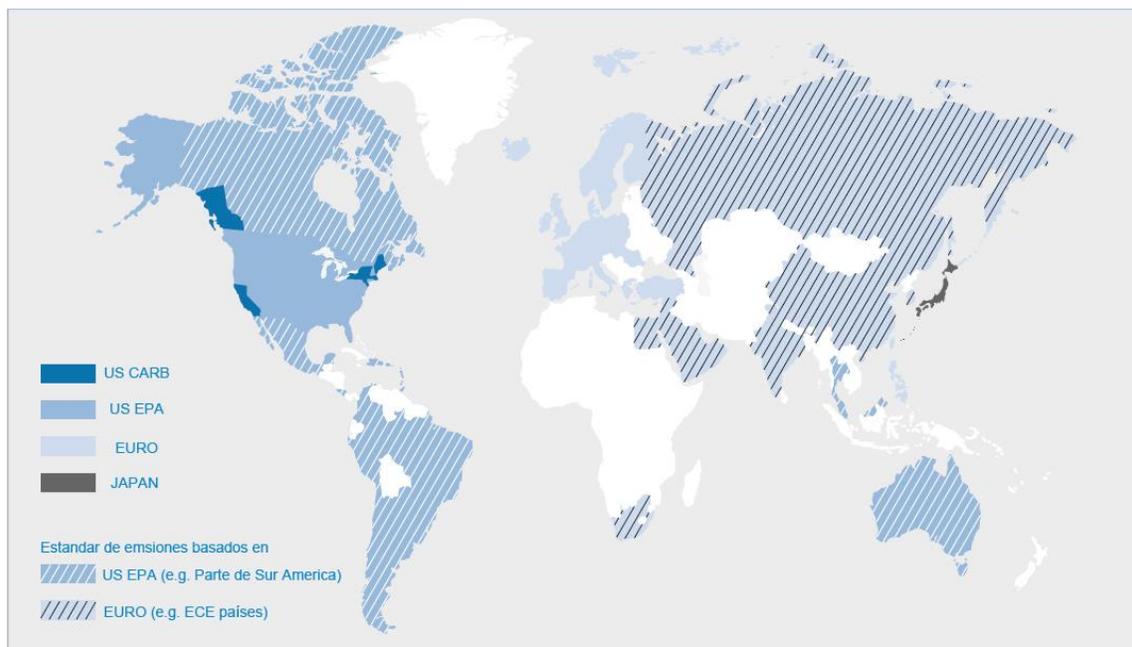
Las restricciones legales más importantes en las emisiones de los gases de escape de los vehículos automotores son:

- La regulación CARB (*California Air Resources Board*, Junta de Recursos del Aire de California).
- La regulación EPA (*Environmental Protection Agency*, Agencia de Protección del Medio Ambiente) de EUA.
- La regulación EURO (Unión Europea).
- La regulación Japonesa.

Las regulaciones parten de la clasificación de vehículos de pasajeros, variando según el país y camiones pesados. Estos últimos incluyen a los autobuses, tractocamiones y los vehículos fuera de carretera (vehículos de construcción, agrícola, mineros, etc.).

En la Figura 3.1 se presenta un mapa que establece la legislación adoptada por país. Muestra la legislación CARB establecida en EUA, implementada en el estado de California, Nueva York y Maine, así como en British Columbia en Canadá. La norma EPA está implementada en el resto de los estados de EUA y de Canadá. La

regulación EURO es implementada en la Unión Europea. México, Australia, Tailandia, Malasia y países de Sur América adoptaron la normatividad EPA, al igual que países del continente asiático (excepto Japón quien tiene su propia legislación japonesa), mientras que algunos pocos del continente africano, como Sudáfrica y Egipto, se adaptaron a la legislación EURO.



Fuente: Imágenes extraídas del libro Gasoline Engine Management Systems and Components (Bosch Automotive Professional, 2015)

**Figura 3.1 Áreas de aplicación de la regulación para los vehículos de pasajeros y vehículos comerciales**

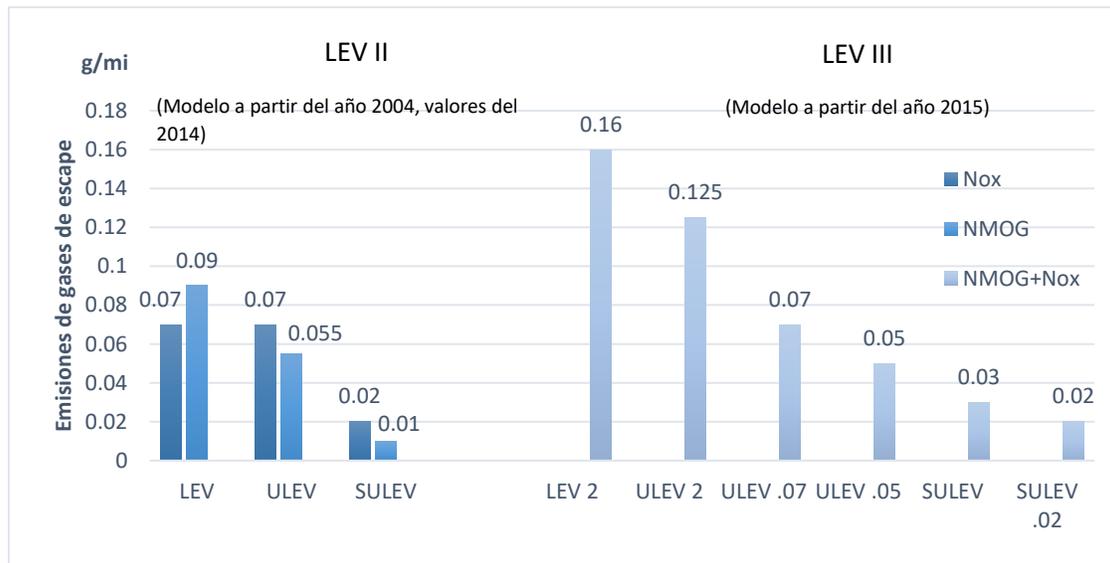
### 3.1 Límites de emisiones por legislación CARB

La California *Air Resources Board* (CARB) es un órgano público de California adscrita a la *Environmental Protection Agency* de California (CAL/EPA), fundada en 1967, siendo la responsable de mantener la calidad del aire en niveles saludables en todo el estado. Tiene por objetivo crear políticas y regulaciones para cumplir las regulaciones relativas a la contaminación del aire. California es el único estado de la unión al cual le es permitido contar con una agencia de este tipo y emitir sus propios estándares para regular la contaminación del aire, ya que contaba con esas facultades legales antes de la aprobación del Acta del Aire Limpio en el ámbito federal, en respuesta a la mala calidad del aire. Otros estados pueden seguir los estándares establecidos por CARB, siempre que no sean inferiores a los estándares federales, pero no pueden establecer sus propios estándares (Bosch Automotive Professional, 2015).

Para su implementación se han asignado diferentes categorías de gases de escape, en función de valores de emisión de NMOG (Non-Methane Organic Gases), CO, NO<sub>x</sub> y partículas, siendo éstas:

- LEV (*Low Emission Vehicle/Vehículo e baja emisión*).
- ULEV (*Ultra Low Emission Vehicle/Vehículo de ultra bajas emisiones*).
- SULEV (*Super Ultra Low Emission Vehicle/ Vehículo súper bajo de emisiones*).
- ZEV (*Zero- Emission Vehicle/Vehículo cero emisiones, como son vehículos eléctricos*).

Desde 2004, el registro de vehículos nuevos se ha regido por la norma de emisiones de escape LEV II, para luego añadirse SULEV con límites significativamente más bajos, mientras que las categorías LEV y ULEV permanecerán sin cambios. Los límites de emisiones de CO y NMOG, que en la regulación EPA se consideran como hidrocarburos HCHO, representados como LEV I permanecerán sin cambios, pero no los límites de NO<sub>x</sub>, que son sustancialmente más bajos para LEV II. La regulación LEV III ofrece un total de seis categorías de vehículos, una de las cuales está debajo de SULEV. Además de las categorías de LEV I y LEV II, en la legislación ZEV se definen tres categorías de vehículos de cero emisiones. En la Figura 3.2 se presentan las emisiones de gases de escape para LEV, ULEV; SULEV.



Fuente: Imágenes extraídas del libro Automotive Handbook 9th (Robert Bosch, 2014)

**Figura 3.2 Límites de emisiones para vehículos de pasajeros y vehículos pesados CARB**

## 3.2 Límites de emisiones por legislación EPA

La Agencia de Protección Ambiental (EPA), encargada de proteger la salud humana y proteger el medio ambiente en sus componentes; aire, agua y suelo, estableció la

designación “Bin” para la normativa de vehículos ligeros, como automóviles y motocicletas. En el caso de vehículos de encendido por compresión que utilizan diésel como combustible, la designación correspondiente es “EPA”. Los límites de la normativa para vehículos de pasajeros (Bin, con un número consecutivo descendente), que describe los límites de emisiones contaminantes para vehículos ligeros a gasolina y diésel, se presentan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Límites de emisiones para vehículos de pasajeros (automóviles y motocicletas)**

Etapa	Límite de emisiones (g/mi)			
	NO <sub>x</sub>	CO/10	HCHO	PM (solo diesel)
Bin 10	0.60	0.42	0.156	0.08
Bin 9	0.3	0.42	0.09	0.06
Bin 8	0.2	0.42	0.125	0.02
Bin 7	0.15	0.42	0.09	0.02
Bin 6	0.1	0.42	0.09	0.01
Bin 5	0.07	0.42	0.09	0.01
Bin 4	0.04	0.21	0.07	0.01
Bin 3	0.03	0.21	0.055	0.01
Bin 2	0.02	0.21	0.01	0.01
Bin 1	0	0	0	0

Fuente: Libro Automotive Handbook 9th (Robert Bosch, 2014)

La calidad del combustible es un parámetro sumamente importante para que los motores puedan cumplir con los límites de emisiones contaminantes. Por tanto, la normativa EPA contempla este tema en sus regulaciones, restringiendo de forma paulatina principalmente el contenido de azufre. La evolución del contenido permisible de azufre en la gasolina se presenta en la Tabla 3.2, límites expresados como un intervalo.

**Tabla 3.2 Límites máximos de contenido de azufre en la gasolina**

Año	Límite máximo de azufre (ppm)
2004	120/300
2005	30/90
2006	30/80
2010	30/80

Fuente: Agencia de Protección Ambiental, Estándares de Emisiones Guía de Referencia ([www.epa.gov](http://www.epa.gov))

En la Tabla 3.3 se presenta la legislación para vehículos pesados que utilizan diésel como combustible, indicando los valores máximos de acuerdo con la implementación de la norma EPA, incluyendo, además, el requerimiento de la calidad de combustible para cumplir con la regulación. Como se puede observar, su implementación a lo largo del tiempo presenta una reducción gradual del límite de emisiones, según el año de implementación.

**Tabla 3.3 Límites de emisiones para vehículos pesados**

Etapa	Año de implementación	Límite de emisiones (g/kW-h)				Combustible (ppm)
		NO <sub>x</sub>	CO	HC	PM	
EPA 91	1991	6.70	15.50	15.50	0.10	2 500
EPA 94	1994	5.00	15.50	1.30	0.10	500
EPA 98	1998	4.00	15.50	1.30	0.10	500
EPA 04	2004	2.50	15.50	1.30	0.10	500
EPA 07	2007	0.20	15.50	1.30	0.01	15
EPA 10	2010	0.20	15.50	1.30	0.01	15
EPA 13	2013	0.20	15.50	1.30	0.01	15
EPA 17	2017	0.20	15.50	1.30	0.01	15

Fuente: Agencia de Protección Ambiental, Estándares de Emisiones Guía de Referencia ([www.epa.gov](http://www.epa.gov))

Para los motores de encendido por compresión se observa la disminución paulatina de los límites en los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y el material particulado (PM), mientras que los hidrocarburos no quemados (HC) y el monóxido de carbono (CO) se mantienen sin cambios. Una tendencia similar se tiene para los NO<sub>x</sub> para los motores encendidos por chispa, conservando los límites de CO y HCHO (formaldehído atmosférico) a partir de Bin 9.

### 3.3 Límites de emisiones por legislación EURO

En Europa, así como a nivel mundial, se han emitido decretos y disposiciones legales con el propósito de reducir las emisiones contaminantes que se expulsan al medio ambiente por los vehículos de carretera. En la Unión Europea, la Agencia Europea del Medio Ambiente ha seguido las tendencias de aplicación de normas de emisiones vehiculares en los Estados Unidos. Con una política similar, la Unión Europea define una serie de directivas de implantación progresiva de las normas respectivas.

Las normativas europeas sobre emisiones contaminantes que emiten los vehículos son denominadas EURO. Las aplicables a vehículos de pasajeros (encendido por chispa) se preceden con número arábigos, como EURO 1, EURO 2, EURO 3, etc. Para vehículos comerciales, vehículos pesados como autobuses, camiones y tractocamiones, la designación es con número romanos, como EURO I, Euro II, Euro III, etc. Estas normativas indican a la industria automotriz los límites de las emisiones contaminantes para la homologación de nuevos modelos de vehículos.

La normativa europea contempla la categoría de vehículos pesados con motores diésel que, en general, incluye camiones y autobuses con peso de una masa mayor a 3500 kg. En vehículos con peso menor existen cuatro categorías, a decir: vehículos turismo, vehículos industriales ligeros con peso menor o igual a 1305 kg, vehículos industriales ligeros con peso de 1305 a 1760 kg y vehículos industriales ligeros con peso de 1760 a 3500 kg. En todas estas categorías se incluyen límites para los motores a gasolina y diésel, mostrándose un resumen en la Tabla 3.4 para vehículos en la categoría de 1760 a 3500 kg, tanto con motores diésel como de

gasolina, mientras que en la Tabla 3.5 se indica lo correspondiente para vehículos con motor diésel y peso mayor a 3 500 kg, de acuerdo con el Ciclo Estacionario Europeo (ESC).

**Tabla 3.4 Límites de emisiones para vehículos pasajeros**

Etapa	Año	Límite de emisiones (g/km)				
		CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM	PN (1/km)
EURO 1	1992	2.72	0.97	-	-	-
EURO 2	1996	2.20	0.50	-	-	-
EURO 3	2000	2.30	0.20	0.15	-	-
EURO 4	2005	1.00	0.10	0.08	-	-
EURO 5	2009	1.00	0.10	0.06	0.005	-
EURO 6	2014	1.00	0.10	0.06	0.005	6x10 <sup>11</sup>

Fuente: Libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

**Tabla 3.5 Límites de emisiones para vehículos comerciales**

Etapa	Año	Límite de emisiones (g/kW-h)					
		CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM	Humo	Combustible (ppm)
EURO 0	1988	12.30	2.60	15.80	-	-	-
EURO I	1992 <85 kW	4.50	1.10	8.00	0.612	-	2 000
	>86kW	4.50	1.10	8.00	0.36	-	-
EURO II	1996	4.00	1.10	7.00	0.25	-	500
	1998	4.00	1.10	7.00	0.15	-	-
EURO III	2000	2.10	0.66	5.00	0.20/0.13	0.80	350
EURO IV	2005	1.50	0.46	3.50	0.02	0.5	50
EURO V	2008	1.50	0.46	2.00	0.02	0.5	10
EURO VI	2013	1.50	0.13	0.40	0.01	0.5	10

Fuente: Libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014), Fuente de la calidad de combustible ANPACT

### 3.4 Límites de emisiones por legislación Japonesa

Debido al incremento de la contaminación, que ha provocado enfermedades en su población, una mala calidad del aire y contaminación del agua, Japón ha implementado normas estrictas desde la década de 1960 para proteger el medio ambiente. Desde entonces, han surgido normativas que restringen la contaminación de aire y agua. Por ejemplo, la normativa en las emisiones de hollín y humo, que había entrado en vigor en 1962, fue incorporada a la Ley de Control de la Contaminación Atmosférica de 1968. La Ley Fundamental de Medidas contra la Contaminación, aprobada en 1967, intentaba crear principios y políticas comunes para el control de la contaminación en todas las agencias gubernamentales y promover esfuerzos integrados para limpiar el entorno.

El Gobierno nacional Japonés estableció una regulación de las emisiones provenientes de los vehículos en 2002, en la que se establecen restricciones en materia particulada (PM), adicionales a las limitaciones existentes en óxido nitroso (NO<sub>2</sub>). Esta norma surgió para dar solución al problema de la contaminación atmosférica provocada por el NO<sub>2</sub> y las partículas que emiten los vehículos de

combustión interna, tanto a gasolina como a diésel, que pueden circular por las principales zonas metropolitanas designadas. Según un estudio, la mayor parte del material particulado y aproximadamente el 80% del óxido nitroso que emiten los vehículos de motor, provienen de los motores diésel (Web Japan, 2018).

Los valores de limitación de emisiones en Japón han estado sujetos a cambios más estrictos desde noviembre de 2007, en un marco de establecimiento de nuevas normas, mientras que las aplicables a vehículos diésel lo estuvieron a partir de septiembre de 2010. En el caso de los vehículos con motores de gasolina, los ciclos de prueba sintéticos fueron reemplazados en dos etapas, 2008 y 2011. Los límites correspondientes se presentan en la Tabla 3.6, según las nuevas normas y en la Tabla 3.7 lo referente a propuestas de largo plazo. En dichas tablas se especifican los límites para el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrocarburos sin metano (NMHC), partículas y opacidad del humo. Respecto a partículas, se aplica para vehículos diésel desde 2009 y para inyección directa de gasolina con tecnología de reducción de NO<sub>x</sub>, pero más pobre, mientras que el criterio de opacidad aplica únicamente para vehículos diésel (Robert Bosch, 2014).

**Tabla 3.6 Límites de emisiones para los vehículos de pasajeros (nuevos estándares a largo plazo)**

Tipo de combustible	Límite de emisiones (g/km)			
	CO	NO <sub>x</sub>	NMHC	Partículas
Gasolina	1.15	0.05	0.5	-
Diésel	0.63	0.14	0.024	0.013

**Tabla 3.7 Límites de emisión para los vehículos de pasajeros (crear nuevos estándares a largo plazo, propuestas)**

Tipo de combustible	Límite de emisiones (g/km)			
	CO	NO <sub>x</sub>	NMHC	Partículas
Gasolina	-	-	-	-
Diésel	0.63	0.08	0.024	0.005

Fuente: Libro Automotive Handbook 9th (Robert Bosch, 2014)

### 3.5 Límites de emisiones por legislación en México

En México existen regulaciones a través de dos denominaciones: la Norma Mexicana (NMX) y la Norma Oficial Mexicana (NOM). De acuerdo con lo establecido en el artículo 3° de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, la NMX es la que elabora un organismo nacional de normalización o una Secretaría que prevé, para un uso común y repetido, reglas, especificaciones, atributos, métodos de prueba, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado. En contraparte, las NOM corresponden a una regulación técnica de observancia obligatoria expedida por las dependencias competentes, conforme a las finalidades establecidas en el artículo 40, que establece reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a

un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se refieren a su cumplimiento o aplicación (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2018).

En la actualidad, en México existen tres normas principales que establecen los límites máximos permisibles de emisiones contaminantes. Una de ellas aplica a los vehículos que ya se encuentran en circulación (NOM-041-SEMARNAT), otra es la correspondiente a vehículos nuevos a gasolina (NOM-042-SEMARNAT) y la restante para vehículos a diésel, incluyendo lo que están en circulación (NOM-044-SEMARNAT).

La NOM-041-SEMARNAT establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible (Diario Oficial de la Federación, 2015). Su primera versión fue en el año 2006 y su última versión en el año 2015, en la que se actualizaron los valores de emisiones contaminantes. El objetivo de esta norma es establecer los límites máximos de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, oxígeno y óxido de nitrógeno; así como el nivel mínimo y máximo de la suma de monóxido y bióxido de carbono. Esta norma exenta a vehículos con peso bruto vehicular menor de 400 kg, motocicletas, tractores agrícolas, maquinaria dedicada a las industrias de la construcción y minera. Establece, también, aspectos y características aplicables a los programas de verificación vehicular, que puede ser realizada a través de dos métodos: el método estático y el método dinámico.

El método estático es un método de medición de los gases (HC, CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>) en el escape de los vehículos automotores en circulación equipados con motores que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos, estando el vehículo estacionado. A diferencia del anterior, el método dinámico consiste en medir los gases (HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) bajo condiciones de aceleraciones simuladas mediante la aplicación de una carga externa controlada por un dinamómetro, realizando pruebas a 24 km/h y 40 km/h (Diario Oficial de la Federación, 2014).

En la Tabla 3.8 se presentan los límites máximos de emisiones del método estático, obtenidos de la NOM-041-SEMARNAT-2014, en la Tabla 3.9 se presentan los valores de los límites máximos permisibles del método dinámico de la misma NOM, clasificando los vehículos por año

**Tabla 3.8 Límites máximos permisibles de emisión del método estático**

Año-modelo vehicular	HC (ppm)	CO (%vol)	O <sub>2</sub> (%vol)	CO+CO <sub>2</sub> (%vol)		Factor Lambda max.
1993 y anteriores	400	3.0	2.0	13	16.5	1.05
1994 y posteriores	100	1.0	2.0	13	16.5	1.05

**Tabla 3.9 Límites máximos permisibles de emisión del método dinámico**

Año-modelo vehicular	HC (ppm)	CO (%vol)	O <sub>2</sub> (%vol)	NO <sub>x</sub> (ppm)	CO+CO <sub>2</sub> (%vol)		Factor Lambda max.
1990 y anteriores	350	2.5	2.0	2 500	13	16.5	1.05
1991 y posteriores	100	1.0	2.0	1 500	13	16.5	1.05

Notas: 1.- ppm o hppm ( $\mu\text{mol/mol}$ ) y 2.- %vol. ( $\text{cmol/mol}$ )

Complementariamente, la NOM-045-SEMARNAT establece los límites máximos permisibles de coeficiente de absorción de luz y el porcentaje de opacidad, provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan diésel como combustible. De manera similar a la anterior, su obligatoriedad excluye la maquinaria equipada con motores a diésel empleada en las actividades agrícolas, de la construcción y de la minería.

Las normas vigentes que regulan y establecen límites máximos de las emisiones en los vehículos automotores ligeros nuevos es la NOM-042-SEMARNAT y para vehículos pesados a diésel nuevos (mayor de 3857 kg) la NOM-044-SEMARNAT. Ambas normas son expedidas por el Comité Consultivo de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

La Norma Oficial Mexicana NOM-042-SEMARNAT, establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos, cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3857 kg y que, además, usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diésel. Además, trata de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos (Diario Oficial de la Federación, 2005). Esta NOM aplica tanto a los vehículos nuevos fabricados en México, como a los fabricados en otros países que se importen definitivamente en el territorio nacional. En la Tabla 3.10 se presentan los valores de los límites correspondientes de las emisiones que se expulsan al medio ambiente, que ya fueron procesadas por los sistemas de reducción de emisiones contaminantes propios del vehículo, con un estándar de durabilidad de 80 mil km, mientras que la Tabla 3.11 lo hace respecto al estándar de durabilidad de 100 mil km. Con el propósito de interpretar dichas tablas se requieren las siguientes definiciones:

*Año:* Año calendario en el cual se apliquen los límites máximos permisibles del estándar C, el cual será al momento en el que el instrumento normativo correspondiente establezca la plena disponibilidad en el territorio nacional de gasolina con un contenido promedio de azufre de 30 ppm y un máximo de 80 ppm y de diésel de 10 ppm máximo de contenido de azufre, respectivamente. La aplicación de estos límites máximos permisibles no será menor a 18 meses a partir de la publicación en el Diario Oficial de la Federación del instrumento normativo que establezca la disponibilidad de combustible con la calidad anteriormente señalada.

*Año modelo:* Periodo comprendido entre el inicio de la producción de determinado tipo de vehículo automotor y el 31 de diciembre del año calendario con que dicho fabricante designe al modelo en cuestión.

#### Clasificación de vehículos

*Vehículo de pasajeros (VP):* Automóvil, o su derivado, excepto el vehículo de uso múltiple o utilitario y remolque, diseñado para el transporte de hasta 10 personas.

*Camiones ligeros (CL1):* Camiones ligeros (grupo uno) cuyo peso bruto vehicular es de hasta 2722 kg y con peso de prueba (PP) de hasta 1701 kg.

*Camiones ligeros (CL2):* Camiones ligeros (grupo dos) cuyo peso bruto vehicular es de hasta 2722 kg y con peso de prueba (PP) mayor de 1701 y hasta 2608 kg.

*Camiones ligeros (CL3):* Camiones ligeros (grupo tres) cuyo peso bruto vehicular es mayor de 2722 y hasta 3857 kg y con peso de prueba (PP1) de hasta 2608 kg.

*Camiones ligeros (CL4):* Camiones ligeros (grupo 4) cuyo peso bruto vehicular es mayor de 2722 y hasta 3857 kg y con peso de prueba (PP1) mayor de 2608 y hasta 3857 kg.

*Vehículo de uso múltiple o utilitario (VU):* Vehículo automotor diseñado para el transporte de personas y/o productos, con o sin chasis o con equipo especial para operar ocasionalmente fuera del camino. Para efectos de prueba se clasificarán igual que los camiones ligeros.

*Camión ligero clase 1 (CL) / Vehículo utilitario clase 1 (VU):* Camión ligero, vehículo utilitario cuya masa de referencia es hasta 1305 kg.

*Camión ligero clase 2 (CL) / Vehículo utilitario Clase 2 (VU):* Camión ligero, Vehículo utilitario cuya masa de referencia es mayor a 1305 kg y hasta 1760 kg.

*Camión ligero clase 3 (CL) / Vehículo utilitario clase 3 (VU):* Camión ligero, Vehículo utilitario cuya masa de referencia es mayor a 1760 kg.

**Tabla 3.10 Límites máximos permisibles de emisiones para vehículos con estándar de durabilidad de 80 mil km.**

Estándar	Clase	CO (g/km)		HCNM (g/km)		NO <sub>x</sub> (g/km)		Part (1) (g/km)		HCev (2) (g/prueba)	
		Gasolina, gas L.P. y gas natural	Diesel	Gasolina, gas L.P. y gas natural	Diesel	Gasolina, gas L.P. y gas natural	Diesel	Gasolina, gas L.P. y gas natural	Diesel	Gasolina, gas L.P. y gas natural	Diesel
A	VP	2.11		0.156		0.25	0.62	-	0.050	2.0	-
	CL1 y VU										
	CL2 y VU	2.74		0.200		0.44	0.62	-	0.062		
	CL3 y VU0.62										
CL4 y VU	3.11		0.240		0.68	0.95	-	0.075			
B	VP	2.11		0.099		0.249		-	0.050	2.0	-
	CL1 y VU										
	CL2 y VU	2.74		0.121			-	0.062			
	CL3 y VU0.62										
CL4 y VU							0.075				
C	VP	2.11		0.047		0.068		-	0.050	2.0	-
	CL1 y VU										
	CL2 y VU	0.240		0.124			-	0.062			
	CL3 y VU0.62										
CL4 y VU							0.075				

Nota:

(1) Aplica sólo para vehículos a diésel

(2) Aplica solo para vehículos a gasolina y gas L.P.

Estándar A. Límites máximos permisibles para vehículos año modelo 2004 y hasta 2009

Estándar B. Límites máximos permisibles para vehículos año modelo 2007 y hasta Año 3

Estándar C. Límites máximos permisibles aplicables a partir del Año 1 y posteriores

Fuente: NORMA Oficial Mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003

**Tabla 3.11 Límites máximos permisibles de emisión para vehículos con estándar de durabilidad de 100 mil km.**

Estándar	Clase	CO (g/km)		HCNM (g/km)	HC + NO <sub>x</sub> (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)		Part (1) (g/km)		HCev (2) (g/prueba)	
		Gasolina, gas L.P. y gas natural	Diesel	Gasolina, gas L.P. y gas natural	Diesel	Gasolina, gas L.P. y gas natural	Diesel	Gasolina, gas L.P. y gas natural	Diesel	Gasolina, gas L.P. y gas natural	Diesel
B	VP	2.125	0.64	0.125	0.56	0.100	0.50	-	0.050	2.0	-
	CL y VU Clase 1										
	CL y VU Clase 2	2.26	0.80	0.162	0.72	0.125	0.65	-	0.070		
	CL y VU Clase 3	2.83	0.95	0.200	0.86	0.137	0.78	-	0.100		
C	VP	1.00	0.50	0.10	0.30	0.08	0.25	-	0.025	2.0	-
	CL y VU Clase 1										
	CL y VU Clase 2	1.81	0.63	0.13	0.39	0.10	0.33	-	0.33		
	CL y VU Clase 3	2.27	0.74	0.16	0.46	0.11	0.39	-	0.39		

(3) Aplica sólo para vehículos a diésel

(1) Aplica solo para vehículos a gasolina y gas L.P.

Estándar B. Límites máximos permisibles para vehículos año modelo 2007 y hasta Año 3

Estándar C. Límites máximos permisibles aplicables a partir del Año 1 y posteriores (ver tabla 3.10)

Fuente: NORMA Oficial Mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003

La Norma Oficial Mexicana-044-SEMARNAT trata acerca de los límites máximos permisibles de emisión del escape de motores a diésel nuevos, empleados por vehículos con peso bruto vehicular mayor a 3857 kg. Considera que esos vehículos generan contaminantes atmosféricos y, por ello, es necesario regular sus emisiones, puesto que está confirmado que tales emisiones incluyen contaminantes que afectan la calidad del aire y con ello la salud pública. La Norma Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2006 fue la primera versión publicada en el Diario Oficial de la Federación, la cual ha ido evolucionando a lo largo del tiempo. Su objetivo es que los motores nuevos a diésel y los vehículos pesados nuevos que los incorporen y que se enajenen por primera vez en el territorio nacional, cuenten con tecnologías más eficientes y menos contaminantes asociadas a los estándares contemplados. Incluye la incorporación de aquellos métodos o ciclos de prueba que sean aplicables a esos motores y a los vehículos, para que cumplan con los criterios correspondientes. La Tabla 3.14 muestra los límites máximos permisibles de emisiones para los motores y vehículos que los integren, certificados mediante los métodos de prueba establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de América.

**Tabla 3.12 Límites máximos permisiones de emisiones para motores certificados por la EPA**

Estándar	Equivalente	Método de prueba	CO	NO <sub>x</sub>	HCNM	HVNM+NO <sub>x</sub>	Part
			g/bhp-h				
1A	EPA 2004	CT y CSE	15.5	No aplica	No aplica	2.4 (3)	0.10
1AA	EPA 2005	CT y CSE	15.5	1.2	0.14	No aplica	0.01
1B	EPA 2010	CT y CSE	15.5	0.20	0.14	No aplica	0.01

Notas:

1. g/bhp-hr = gramos por caballo de fuerza al freno por hora.
2. Estándar 1A. Límites máximos permisibles para motores y vehículos automotores nuevos producidos a partir de la entrada en vigor de esta norma y hasta el 30 de junio de 2019, obtenidos con los métodos de prueba Ciclo Suplementario Estable (CSE) y Ciclo Transitorio (CT).
3. El estándar 1A admite un máximo de 2.5 g/bhp-h para HCNM+NO<sub>x</sub>, siempre y cuando los HCNM sean menores o iguales a 0.5 g/bhp-h.
4. Estándar 1AA. Límites máximos permisibles para motores y vehículos automotores nuevos producidos a partir del 1 de enero de 2019 y hasta el 31 de diciembre de 2020, obtenidos con los métodos de prueba Ciclo Suplementario Estable (CSE) y Ciclo Transitorio (CT).
5. Estándar 1B. Límites máximos permisibles para motores y vehículos automotores nuevos producidos a partir del 1 de enero de 2019, obtenidos con los métodos de prueba Ciclo Suplementario Estable (CSE) y Ciclo Transitorio (CT). Este estándar requiere el uso de diésel automotriz con un contenido máximo de azufre de 15 mg/kg, el cual estará disponible en el país, conforme a lo establecido en la nota 3 de la Tabla 7 de la norma oficial mexicana NOM-016-CRE-2016 Especificaciones de la calidad de los petrolíferos, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de agosto de 2016.

Fuente: NORMA Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017

Los estándares deben estar certificados mediante los métodos conocidos como: Ciclo Suplementario Estable (CSE) y Ciclo Transitorio (CT), aprobados por la EPA. En este caso, los fabricantes deben presentar sus certificados de origen emitidos por esa misma autoridad ambiental.

Para cumplir con los límites de los estándares 11A, 1AA o 1B, los motores deben de cumplir con la vida útil (distancia o tiempo, lo que ocurra primero), de acuerdo con el peso bruto vehicular del vehículo, establecidos en la Tabla 3.15.

**Tabla 3.13 Vida útil de los vehículos con motores nuevos certificados por la EPA**

Peso Bruto Vehicular (PBV) en kg	Vida útil	
	Distancia (km)	Tiempo (años)
3857 a 8845	177 023	10
8846 a 14970	297 721	
14971 y mayores	700 046	

Complementariamente, la Tabla 3.16 indica los límites máximos permisibles de emisión aplicables a motores certificados mediante métodos de prueba establecidos por el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea (EURO), así como por la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa. Los estándares deben estar certificados mediante los métodos de prueba de Ciclo Europeo de Estado Continuo (CEEC), Ciclo de Transición (CET), o Ciclo Estado Estable Mundial Armonizado de Prueba (CEEMAP), aprobados por el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión para Europa. En este caso, los fabricantes deben presentar sus certificados de origen emitidos por la autoridad ambiental.

**Tabla 3.14 Límites máximos permisiones de emisiones para motores certificados por la EURO**

Estándar	Equivalente	Método de prueba	CO	NO <sub>x</sub>	HC	HCNM	Part	Núm. Part.	NH <sub>3</sub>
			g/kWh (1)					Número kWh	Ppm
2 <sup>a</sup>	EURO IV	CEEC	1.5	3.5	0.46	No aplica	0.02	No aplica	No aplica
		CET	4.0		No aplica	0.55	0.03	No aplica	No aplica
2AA	EURO V	CEEC	1.5	2.0	0.46	No aplica	0.02	No aplica	No aplica
		CET	4.0	2.0	No aplica	0.55	0.03	No aplica	No aplica
2B	EURO VI	CEEMAP	1.5	0.4	0.13	No aplica	0.01	8.0 x 10 <sup>11</sup>	10
		CETMAP	4.0	0.46	0.16	No aplica	0.01	6.0 x 10 <sup>11</sup>	10

Notas:

1. g/kWh = gramos por kilowatt hora.
2. Número/kWh= número de partículas por kilowatt hora.
3. Ppm= partes por millón.
4. Estándar 2A. Límites máximos permisibles para motores y vehículos automotores nuevos producidos a partir de la entrada en vigor de esta norma y hasta el 30 de junio de 2019, obtenidos con los métodos de prueba de Ciclo Europeo de Estado Continuo (CEEC) y Ciclo Europeo de Transición (CET), establecidos por el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea.

5. Estándar 2AA. Límites máximos permisibles para motores y vehículos automotores nuevos producidos a partir del 1 de enero de 2019 y hasta el 31 de diciembre de 2020, obtenidos con los métodos de prueba de Ciclo Europeo de Estado Continuo (CEEC) y Ciclo Europeo de Transición (CET), establecidos por el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea.
6. Estándar 2B. Límites máximos permisibles para motores y vehículos automotores nuevos producidos a partir del 1 de enero de 2019, obtenidos con los métodos de prueba de Ciclo Estado Estable Mundial Armonizado de Prueba (CEEMAP) y Ciclo Estado Transitorio Mundial Armonizado de Prueba (CETMAP), establecidos por la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa. Este estándar requiere el uso de diésel automotriz con un contenido máximo de azufre de 15 mg/kg, el cual estará disponible en el país, conforme a lo establecido en la nota 3 de la Tabla 7 de la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016 Especificaciones de la calidad de los petrolíferos, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de agosto de 2016.

Fuente: NORMA Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017

Para cumplir con los límites de los estándares 2A, 2AA o 2B, los motores certificados por la norma EURO, deben cumplir con la vida útil (distancia o tiempo, lo que ocurra primero), de acuerdo con el peso bruto vehicular del vehículo, establecidos en la Tabla 3.17.

**Tabla 3.15 Vida útil de los vehículos con motores nuevos certificados por la EURO**

Peso Bruto Vehicular (kg)	Vida útil			
	Distancia (km)			Tiempo (años)
	Estándar 2A	Estándar 2AA	Estándar 2B	Estándar 2A, 2AA, 2B
3857 a 15999	200 000	200 000	300 000	6
16000 y mayores	500 000	500 000	700 000	7

Fuente: NORMA Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017

Según se indica en la norma, los vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor a 3857 kg y hasta 6350 kg (o su equivalente de 8500 libras hasta 14000 libras), podrán aplicar una prueba de dinamómetro de chasis, mediante el método de prueba denominado FTP 75, establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, como alternativa para cumplir con los estándares 1A y 1B. En este caso, los vehículos nuevos deberán cumplir con los límites máximos permisibles de emisiones que se indican en la Tabla 3.16.

Para los vehículos automotores nuevos que se certifiquen a través del método de prueba denominado Ciclo en Ciudad FTP 75, deberán cumplir con el estándar 3A o 3B, contemplados en la Tabla 3.18, según corresponda, siendo la vida útil, en ambos casos, de 193121 km u 11 años.

**Tabla 3.16 Límites máximos permisibles del escape para vehículos de un peso mayor a 3857 y menor a 6350 kg**

Estándar	Equivalente	Peso Bruto Vehicular (kg)	Método de prueba	NO <sub>x</sub>	HCNM	Part
				g/km		
3A	EPA 2004/EURO IV	38574 – 4539	FTP 75	0.311	0.121	0.037
		4540 – 6350		0.435	0.143	0.037
3B	EPA 2010/EURO VI	3857 – 4539	FTP 75	0.124	0.121	0.012
		4540 – 6350		0.249	0.143	0.012

Notas:

7. g/km = gramos por kilómetro.
8. Estándar 3A. Límites máximos permisibles para vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor a 3857 kg y hasta 6350 kg, producidos a partir de la entrada en vigor de la presente norma oficial mexicana y hasta el 30 de junio de 2019, obtenidos con el método de prueba denominado Ciclo en Ciudad FTP (FTP 75), establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América.
9. Estándar 3B. Límites máximos permisibles para vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor a 3857 kg y hasta 6350 kg, producidos a partir del 1 de enero de 2019, obtenidos con el método de prueba denominado Ciclo en Ciudad FTP (FTP 75), establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América. Los valores del estándar B equivalentes en gramos por milla (g/mi) se presentan en el Apéndice D. Este estándar requiere el uso de diésel automotriz con un contenido máximo de azufre de 15 mg/kg, el cual estará disponible en el país, conforme a lo establecido en la nota 3 de la Tabla 7 de la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016. Especificaciones de la calidad de los petrolíferos, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de agosto de 2016.

Fuente: NORMA Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017

Los vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor de 3857 kg y masa de referencia menor o igual a 2840 kg, podrán aplicar una prueba de dinamómetro de chasis, mediante el método de prueba Nuevo Ciclo Europeo de Prueba (NCEP), establecido por el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea como alternativa para cumplir con los estándares 2A, 2AA y 2B de esta norma oficial mexicana. En este caso, los vehículos nuevos deberán cumplir con lo indicado en la Tabla 3.19, considerando que para los estándares 4A, 4AA y 4B, la vida útil es de 160 000 km o 5 años, lo que suceda primero.

**Tabla 3.17 Límites máximos permisibles del escape para vehículos de un menor o igual a 2 840 que integren un motor diésel nuevo kg**

Estándar	Equivalente	Masa de referencia (kg)	Método de prueba	CO	NOx	HC+NOx	Part	Núm. Part.
				g/km				Número/km
4A	EPA 2004/EURO IV	2840	NCEP	0.74	0.39	0.46	0.06	No aplica
4AA	EPA 2007/EURO V	2840	NCEP	0.74	0.28	0.35	0.005	No aplica
4B	EPA 2010/EURO VI	2840	NCEP	0.74	0.125	0.215	0.005	6.0x10 <sup>11</sup>

Notas:

1. g/km = gramos por kilómetro.
2. Número de partículas/km: número de partículas por kilómetro.
3. Estándar 4A. Límites máximos permisibles para vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor a 3857 kg y masa de referencia menor o igual a 2840 kg, producidos a partir de la entrada en vigor de la presente norma oficial mexicana y hasta el 30 de junio de 2019, obtenidos con el método de prueba Nuevo Ciclo Europeo de Prueba (NCEP).
4. Estándar 4AA. Límites máximos permisibles para motores y vehículos automotores nuevos producidos a partir del 1 de enero de 2019 y hasta el 31 de diciembre de 2020, obtenidos con el Nuevo Ciclo Europeo de Prueba (NCEP).
5. Estándar 4B. Límites máximos permisibles para vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor a 3 857 kg y masa de referencia menor o igual a 2 840 kg, producidos a partir del 1 de enero de 2019, obtenidos con el método de prueba Nuevo Ciclo Europeo de Prueba (NCEP). Este estándar requiere el uso de diésel automotriz con un contenido máximo de azufre de 15 mg/kg, el cual estará disponible en el país, conforme a lo establecido en la nota 3 de la Tabla 7 de la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016. Especificaciones de la calidad de los petrolíferos, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de agosto de 2016.

Fuente: NORMA Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017

La versión NOM-044-SEMARNAT-2017 considera la regulación europea y americana en los límites de emisiones. Así, el estándar 1A y 2A considera la implementación de tecnología para que los motores cumplan con los requerimientos de EPA 04 y EURO IV, el 1AA y 2AA aplica para EPA 07 y EURO V, mientras que el 1B y 2B aplica para EPA 10 y EURO VI. Respecto a vehículos por entero (vehículos completos), el estándar 3A y 4A contemplan la tecnología EPA 04 y EURO IV, el 4AA adapta la tecnología EPA 07 y EURO V y el 3B y 4B debe cumplir con EPA 10 y EURO VI, siendo esta última la más reciente. Conforme pase el tiempo, se seguirán modificando las normativas que establecen límites para las emisiones que generan los motores de combustión interna, siendo más exigentes para tener un mejor manejo del consumo de combustible y beneficiar la calidad del aire.

Como ejemplo de la evolución de la aplicación de tecnologías conforme a los requerimientos normativos, se presenta la cronología de las normas de emisiones de vehículos pesados adaptados por algunos países cuya información pudo obtenerse. Para facilitar su interpretación, la Tabla 3.20 muestra la representación de las normas por colores y en la Tabla 3.21 se presenta la cronología de la normativa de emisiones EPA y EURO y la implementación de tecnología para la reducción de emisiones en los vehículos pesado a diésel en algunos países del continente americano, europeo, asiático y oceánico (Consejo Internacional del Transporte Limpio, 2014).

Las revisiones propuestas para la norma NOM-044 ubican a México al frente de las políticas de vehículos limpios en América Latina y de otros mercados automotrices importantes alrededor del mundo. A partir de 2018, se planteó que las normas eliminen prácticamente las emisiones de partículas finas y de carbono negro provenientes de los camiones y autobuses a diésel nuevos. México puede llegar a ser el primer país de ingresos medios del mundo en adoptar e implementar normas de talla mundial basadas en filtros para vehículos pesados. Como se muestra, solo Estados Unidos, Canadá, Japón, la Unión Europea y Corea del Sur han adoptado estas normas.

Dentro de América Latina muchos países han realizado o planean realizar grandes mejoras en la calidad del diésel. La propuesta de México demuestra la posibilidad de omitir las normas de emisiones provisionales y pasar directamente a las mejores prácticas tan pronto como se establezca un plazo de aplicación confiable de las normas de combustible con contenido ultra-bajo de azufre. Las normas basadas en filtros son necesarias para obtener todos los beneficios de las inversiones en combustibles limpios que se han realizado en la región:

- Chile cumple con las normas de diésel con contenido ultra-bajo de azufre desde 2013.
- Brasil, el mayor fabricante de vehículos de la región, y Argentina ofrecen diésel con ultra-bajo contenido de azufre en todas las estaciones de servicio del país.
- La única refinería de Uruguay ahora produce diésel de 10 ppm de azufre.
- Venezuela y Ecuador están invirtiendo conjuntamente en las instalaciones de una nueva refinería para producir diésel con ultra-bajo contenido de azufre.

- Costa Rica, Colombia y Perú requieren o requerirán muy pronto combustible de 50 ppm de azufre a nivel nacional. Actualmente, gran parte del combustible diésel importado a Costa Rica y Colombia contiene solamente 15 ppm de azufre.

**Tabla 3.18 Equivalencia de las normas de emisiones de vehículos pesados de carretera a diésel**

EPA	EURO	Color
91	Pre-II	
94	II	
98	III	
04	IV	
07	V	
10	VI	

**Tabla 3.19 Cronología de la aplicación de normas de emisiones**

Continentes	País	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Americano	Estados Unidos de América								
	Canadá								
	México								
	Brasil								
	Argentina								
	Chile								
	Colombia								
	Perú								
	Uruguay								
	Ecuador								
	Costa Rica								
	Venezuela								
Europeo	Unión Europea								
Asiático	Japón								
	Corea del Sur								
	Rusia								
	China								
	India								
Oceánico	Australia								

Fuente: Regulaciones sobre emisiones de vehículos pesados en México. Consejo Internacional del Transporte Limpio (ICCT) (Consejo Internacional del Transporte Limpio, 2014).



## **4 Tecnologías para la reducción de emisiones de los MCI**

---

Para la aplicación y revisión de regulaciones que establecen los límites de emisiones para los vehículos automotores, se considera el funcionamiento de los MCI, el desarrollo de tecnologías en los vehículos y las mejoras en la calidad de combustibles. Esto, para adaptarse a los lineamientos establecidos en normativas de emisiones vehiculares. Las normas y reglamentos son actualizados constantemente para establecer límites cada vez más restrictivos considerando la aplicación de éstas, con objeto de mejorar la calidad del aire y que los vehículos tengan una combustión eficiente. De manera positiva, las restricciones se han orientado como oportunidad para que los fabricantes de motores apliquen sus desarrollos y cumplan con la normatividad y reglamentación que se establezca.

Como respuesta a la implementación de normativas en términos de emisiones, se han desarrollado tecnologías y dispositivos que permiten la reducción y control de la generación de emisiones contaminantes. Algunas de estas tecnologías corresponden a la mejora de la combustión, refiriéndose a dispositivos que controlan la mezcla de aire y combustible en la cámara de combustión. Esto se ha logrado ya sea que introduzca mayor volumen de oxígeno o la cantidad exacta de combustible inyectado, el cual debe suministrarse para que se aproveche el combustible y se tenga una combustión eficiente. Ejemplo de estas tecnologías son el turbocompresor, la inyección electrónica y el diagnóstico a bordo (OBD). Por otro lado, los dispositivos o sistemas que mitigan las emisiones generadas en la cámara de combustión son dispositivos de oxidación y reducción, como los convertidores catalíticos, la reducción catalítica selectiva (SCR), la recirculación de los gases de escape (EGR) y el filtro de partículas (DPF), entre otros.

### **4.1 Dispositivos que mejoran la combustión de los MCI**

El propósito de los dispositivos, sistemas o tecnologías aplicados para mejorar la calidad de la combustión es el de evitar que se generen emisiones contaminantes o dañinas en la combustión. Se orientan a controlar la entrada de aire y de combustible, así como el consumo de combustible que se inyecta para un uso eficiente. A continuación, se describen algunas tecnologías que han tenido una gran importancia en el avance tecnológico para cumplir con las exigencias de las normativas.

### 4.1.1 Turbocargador

El turbocargador es un componente de sobrealimentación que se adapta a los motores, cuyo objetivo es introducir una mayor cantidad de aire comprimido a la cámara de combustión de los MCI y obtener una mayor potencia. La idea de introducir mayor cantidad de aire llevó al desarrollo del turbocompresor que, en la actualidad, es un elemento muy utilizado. La primera patente de este dispositivo fue por Alfred Büchi (1915), quien había reconocido el potencial del turbocargador para eliminar el gas residual de escape. Han sido utilizados tradicionalmente para motores de gasolina y diésel, originalmente para camiones, locomotoras, motores marinos, maquinaria agrícola y de construcción (Robert Bosch, 2014).

El propósito del turbocompresor es introducir más aire a los cilindros del motor a través de la compresión. Consiste en una turbina accionada por los gases de escape del motor, en cuyo eje se fija un compresor centrífugo que toma el aire a presión atmosférica después de pasar por el filtro de aire; luego lo comprime para introducirlo en los cilindros a mayor presión. Este aumento de presión consigue introducir al cilindro una mayor cantidad de oxígeno que lo que aspiraría únicamente a presión atmosférica. Así se favorece la obtención de mayor potencia, producida por una mayor fuerza que empuja los cilindros en la carrera de expansión. La magnitud de potencia de salida y el par de un motor de combustión están significativamente determinados por el porcentaje de carga de aire fresco en cada cilindro, durante la aspiración. Esto es expresado por la eficiencia volumétrica.

La eficiencia volumétrica especifica la relación entre la carga de aire fresco teórico para cada cilindro de potencia. En la Tabla 4.1 se presentan la eficiencia volumétrica para los motores de combustión interna a gasolina (Europa Lehrmittel, 2014).

**Tabla 4.1 Eficiencia volumétrica de motores de aspiración natural y motores sobrealimentados**

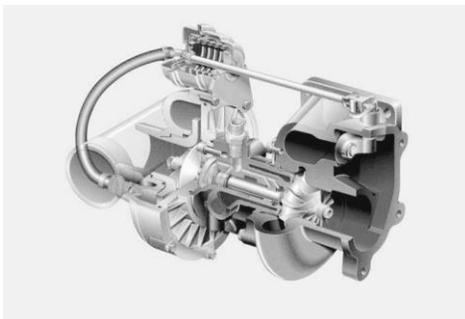
Tipo de motor	Eficiencia volumétrica
Motor de aspiración natural 4 tiempos	0.7 a 0.9
Motor de aspiración natural 2 tiempos	0.5 a 0.7
Motores sobrealimentados	1.2 a 1.6

Fuente: Libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

La eficiencia volumétrica en los MCI puede ser incrementada con la ayuda de dispositivos sobrealimentadores. De esta manera, una mayor masa de aire es admitida en la cámara de combustión y, por tanto, se tiene una mezcla aire-combustible adecuada para que se quemé todo el combustible y reducir los residuos de hidrocarburos no quemados.

Existen una gran variedad de turbocargadores. Los más utilizados en vehículos son los turbocargadores de geometría fija (EGT) y de geometría variable (VGT). Los de geometría fija son los más utilizados, el volumen de aire que entra en la turbina accionada por los gases de escape (Ver Figura 4.1). El inconveniente que presenta es que limita el rango óptimo de funcionamiento del turbo, ya que el tiempo de

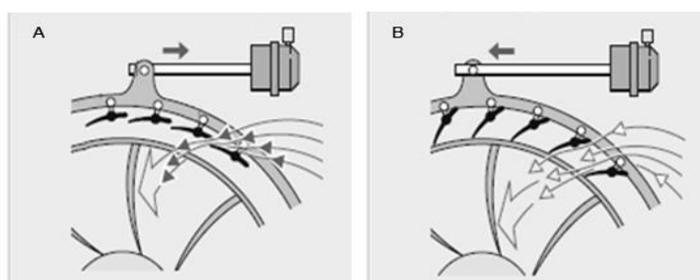
respuesta es proporcional al régimen del motor (RPM) y si el tamaño del turbocargador es muy grande, se necesita una gran fuerza de los gases de escape para mover la turbina que, a cambio, entregará alta presión de aire en la admisión y mucho caudal.



Fuente: Imágenes extraídas del libro Gasoline Engine Management Systems and Components (Bosch Automotive Professional, 2015)

#### Figura 4.1 Turbocargador de geometría fija

Los turbocargadores de geometría variable se desarrollaron para reducir las desventajas de los de geometría fija, que incorporan más piezas que los EGT, permiten adaptarse al rango de revoluciones al que se opere el motor, aprovechando los gases de la cámara de combustión. Los VGT tienen aspas en la entrada de la turbina accionadas electrónicamente, debido a la cantidad de flujo de entrada de aire. Tal como se presenta en la Figura 4.2, se observa que en la primera imagen a) las astas están cerradas y el flujo de aire de entrada de gases es muy poco, mientras que en la b) las aspas están abiertas, lo cual permite la entrada completa de gases de escape y, por tanto, obteniendo una mayor presión de entrada de aire en la turbina de entrada de aire.



Fuente: Imágenes extraídas del libro Gasoline Engine Management Systems and Components (Bosch Automotive Professional, 2015)

#### Figura 4.2 Funcionamiento del turbocargador de geometría variable

En los motores de gasolina se incrementa el consumo de manera proporcional al aumento de masa del aire que entra al motor. Por otro lado, en los motores diésel la masa de aire no es proporcional al gasto de combustible y el aire entra de manera

adicional al carecer de válvula de entrada de aire que restrinja el flujo. Este hecho favorece la aplicación de los turbocompresores, encontrando en los motores diésel una aplicación sumamente efectiva.

En la actualidad se ha convertido en un componente más del motor común. La ventaja de esta tecnología es dirigida a un componente que incrementa el par del motor, reduce consumo de combustible y reduce las emisiones contaminantes al introducir más aire frío. En los motores de gasolina aumenta el volumen del aire, compensando con ello las reducciones drásticas de cilindrada, mientras que en los motores diésel incrementan el flujo sin incrementar proporcionalmente el combustible necesario para la explosión.

El desempeño de los motores de diésel de pasajeros se ha logrado a través inyección directa (1987) y por el turbocargador de geometría variable (1996) o tubo cargador de dos etapas (2004). Estos desarrollos se han reflejado en los motores diésel. En la actualidad, todos los motores a diésel de vehículos ligeros y pesados están equipados con un sobrealimentador de escape (Robert Bosch, 2014).

Los turbocargadores son considerados como componentes que compensan la falta de oxígeno a la cámara de combustión al introducir mayor cantidad de aire. Incluso, algunos presentan menor efecto de la altitud como pérdida de potencia. Al respecto, la Tabla 4.2 presenta las pérdidas de potencia por altitud en los MCI de gasolina y diésel y motores diésel turbocargados. Como se observa, algunos motores diésel no tienen pérdidas hasta cerca de 3650 m (12000 ft). No obstante, si se desea conocer las pérdidas de potencia del motor, lo recomendable es la información proporcionada por el fabricante (Society of Automotive Engineers, 1992).

**Tabla 4.2 Pérdidas de potencia y par en MCI por altitud**

Altitud (pies)	Altitud (m)	Tipo de motor y % de pérdida de HP y Par		
		4 tiempos Gasolina NA	4 tiempos Diesel NA	Diesel Turbocargado
Nivel del mar	Nivel del mar	%	%	%
0	0	0	0	0
1 000	305	4	3	0
2 000	610	8	6	0
3 000	914	12	9	0
4 000	1 219	16	12	0
5 000	1 524	20	15	0
6 000	1 829	24	18	0
7 000	2 134	28	21	0
8 000	2 438	32	24	1
9 000	2 743	36	27	4
10 000	3 048	40	30	7.5
11 000	3 353	44	33	10
12 000	3 658	48	36	12.5

Nota: NA= Aspiración natural

Fuente: Tabla extraída del libro Truck Systems Design Handbook (Society of Automotive Engineers, 1992)

### 4.1.2 Diagnóstico a Bordo (OBD)

Los sistemas OBD monitorean el comportamiento del motor y los dispositivos que controlan la composición de la mezcla aire-combustible, incluso aquellos responsables de controlar las emisiones. Estos sistemas OBD fueron adoptados por primera vez en 1991 en vehículos ligeros de EUA y 10 años después se incorporaron en los europeos (EOBD). Los primeros sistemas OBD eran bastante sencillos y carecían de estandarización, por lo que cada fabricante adoptaba un sistema diferente para intercambiar información entre el vehículo y el conductor.

California fue el primer lugar donde se implementó el OBD I, en 1988, en vehículos ligeros. A partir de 1994 comenzó la segunda etapa regulatoria de emisiones EPA94, incorporando el OBD en vehículos a diésel bajo el protocolo de la *Society of Automotive Engineers* (SAE J1939). Para 1996 los sistemas OBD se estandarizaron y todo fabricante en EUA debió instalar los mismos sistemas de monitoreo y utilizar los mismos mensajes de alerta de mal funcionamiento. Posteriormente, en 2005 (EURO IV) se introdujeron los sistemas OBD para vehículos pesados en Europa y, algunos años después, en EUA, pero solo para vehículos y aplicaciones con peso bruto vehicular (PBV) debajo de los 6360 kg.

A partir del año 2004 el OBD II ha sido un requerimiento obligatorio, debido a que las normas se han actualizado y han sido más estrictas del correcto funcionamiento de los vehículos. De 2007 al 2013, han surgido nuevos requerimientos en el OBD II en los vehículos a gasolina, siendo tal la importancia del diagnóstico por cilindro para que se inyecte la cantidad necesaria de combustible y se tenga la mezcla aire-combustible ideal. Al mismo tiempo, se implementó en los vehículos diésel una extensión de funciones, como la inyección de combustible electrónica, el flujo de entrada por sistemas que controlan la masa de aire al motor y sistemas que controlan las emisiones producidas en la combustión, además de nuevas funciones de monitoreo del convertidor catalítico de oxidación, del filtro de partículas y del convertidor catalítico selectivo.

De 2007 a 2008 se adaptaron nuevos requerimientos del nuevo EOBD para vehículos a gasolina y diésel de pasajeros, dentro del marco de operación de las normas EURO 5 y EURO 6 de emisiones (EURO 5 de septiembre de 2009 y EURO 6 de septiembre de 2014). En 2008 se introdujo la segunda etapa del EOBD para vehículos pesados a diésel en incorporación con la EURO V y la nueva regulación de EOBD fue introducida junto con la EURO VI en el año 2013. Así, en 2010 comenzó a extenderse el requerimiento de OBD a todos los vehículos pesados (Robert Bosch, 2014).

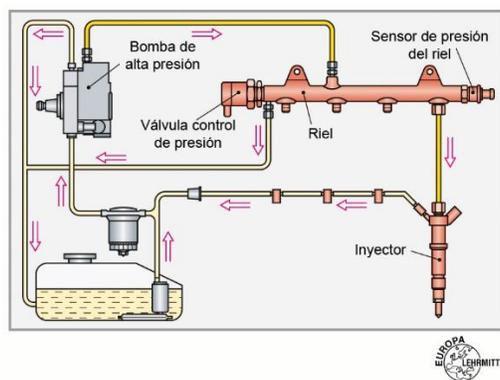
Para enero de 2018 entró en vigor la actualización de la NOM-044, considerando requerimientos de EPA 10 y EURO VI y se implementó la generación de sistemas OBD (OBD II) en todas las categorías de vehículos, tanto en los modelos actuales como en los que surjan en los próximos años.

### 4.1.3 Inyección electrónica de combustible

Contar con una mezcla ideal aire-combustible para la combustión en los cilindros es un requerimiento para tener menor cantidad de gases nocivos. Este aspecto ha sido relevante para la operación del motor y para la inyección precisa de cantidad de combustible y el tiempo de inyección, ya que se debe inyectar en el momento indicado. Estas condiciones tomaron forma en el desarrollo de los sistemas de inyección de combustible, elemento importante en los MCI, en los que la electrónica permitió tener un mayor control y monitoreo del proceso de inyección.

La inyección electrónica de combustible reemplazó el sistema de inyección mecánica, tanto en motores de encendido por chispa como en los de encendido por compresión, controlados por la unidad de control electrónica (ECU) del vehículo. Esto propició que el sistema de inyección fuera más eficiente que el sistema mecánico clásico de carburador, reduciendo, por tanto, la emisión de gases nocivos de forma considerable. Su introducción se debió a un aumento en las exigencias de los organismos de control del medio ambiente para disminuir las emisiones de los motores.

El funcionamiento en los motores a gasolina consiste en medir el flujo de masa de aire que es aspirado por el motor (controlado por la válvula mariposa), registrar a través de la ECU la cantidad de oxígeno de los gases de escape de salida, la temperatura ambiente y el régimen del motor (RPM), con el objetivo de inyectar la cantidad precisa de combustible para que la combustión sea lo más completa posible. A través de los inyectores, el sistema presuriza y atomiza el combustible, inyectándolo conforme a los requerimientos del motor. Consecuentemente, las emisiones de la combustión disminuyen por la medición precisa y la dosificación requerida de la inyección. La Figura 4.3 muestra un esquema en el que se aprecian los diferentes componentes de un sistema de inyección electrónico de combustible.



Fuente: Imágenes extraídas del libro Gasoline Engine Management Systems and Components (Bosch Automotive Professional, 2015)

**Figura 4.3 Sistema de inyección electrónica**

Su importancia en los vehículos de gasolina y diésel es para tener una combustión ideal, es decir teniendo el factor  $\lambda=1$  para la gasolina, mientras que en diésel de 1.3

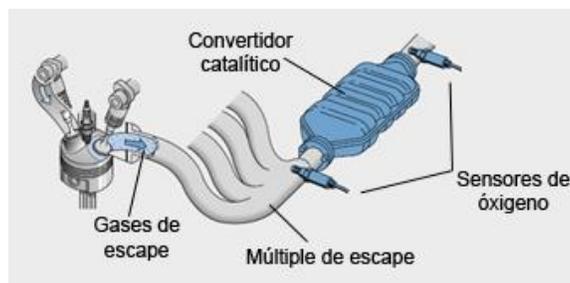
a 18, reduciendo con ello los porcentajes de gases tóxicos emitidos a la atmósfera. La relación estequiométrica es la proporción exacta de aire y combustible que garantiza una combustión completa de todo el combustible. En el caso de los motores a diésel, este sistema aumenta la dosificación del combustible a alta presión, según los requerimientos del motor, reduciendo los óxidos de nitrógeno.

## 4.2 Dispositivos que mitigan las emisiones de los MCI

### 4.2.1 Convertidor catalítico

Los convertidores catalíticos se emplearon por primera vez en vehículos fabricados en 1975, acorde con regulaciones aprobadas dos años antes por la EPA. Dichas exigencias contemplaban la reducción de las emisiones de los automóviles y la solicitud de disminución gradual en el contenido de plomo de todos los combustibles. Lo anterior, con base en un estudio emitido en noviembre de 1973, en el que EPA determinó que el plomo expulsado por los automóviles representaba una amenaza directa a la salud pública. Aunque el convertidor catalítico se desarrolló desde la década de 1950, éste no podía usarse en los vehículos debido al plomo en la gasolina. La regulación del control de emisiones de los vehículos establece que los motores por sí solos no tienen la capacidad de cumplir con los límites establecidos, requiriendo de componentes que eliminen los gases peligrosos que se forman en la combustión. Los catalizadores convierten los gases tóxicos en gases inofensivos, como es el dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno (Robert Bosch, 2014).

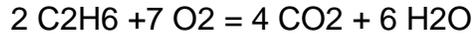
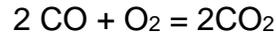
El convertidor catalítico o catalizador, es un dispositivo que está integrado en los vehículos que utilizan combustible fósil, que se ubican después de la cámara de combustión (ver Figura 4.4). Tiene como objetivo controlar y reducir las emisiones peligrosas para el ser humano que se producen por la combustión. Las emisiones que reducen son el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos sin quemar (HC) y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Sus principales elementos de construcción son platino (Pt), rodio (Rd) y paladio (Pd) (Bosch Automotive Professional, 2015).



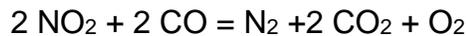
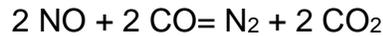
Fuente: Imágenes extraídas del libro Gasoline Engine Management Systems and Components (Bosch Automotive Professional, 2015)

**Figura 4.4 Convertidor catalítico**

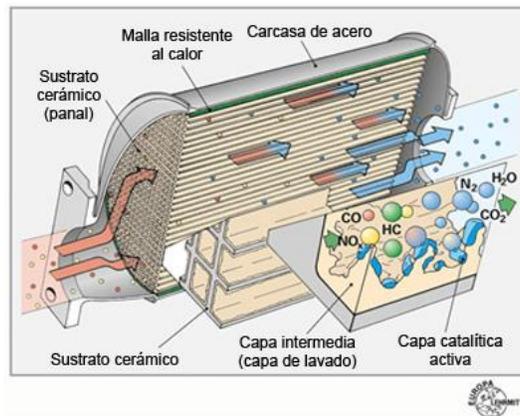
Existen catalizadores de doble y triple vía. El convertidor catalítico de tres vías es un componente integral de los sistemas de control de emisiones de escape de los motores de gasolina para disminuir las emisiones, en el cual ocurren tres reacciones químicas con el  $\text{NO}_x$ , el CO y los HC. Bajo un proceso de oxidación, tanto al monóxido de carbono como a los hidrocarburos se les agrega oxígeno para combinarlos, obteniendo dióxido de carbono y vapor de agua  $\text{CO}_2$ , como se muestra en las siguientes expresiones químicas:



Para la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno es necesario que esté presente el oxígeno, ya que al agregar  $\text{O}_2$  a los óxidos de nitrógeno y al monóxido de carbono se obtienen  $\text{N}_2$  y  $\text{CO}_2$ , que no son gases tóxicos. Esto se muestra como:



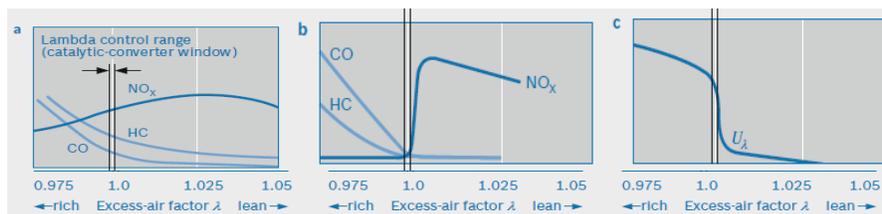
La oxidación de los HC sin quemar se reduce con el platino, mientras que el proceso de oxidación del monóxido de carbono y la reducción de  $\text{N}_2$  se mitiga en presencia de rodio u otros catalizadores como circonio o paladio, más baratos que el rodio, pero menos eficientes. Estos catalizadores se emplean en motores de gasolina ya que la proporción de  $\text{NO}_x$  es mucho menor que en los diésel, al no trabajar con exceso de oxígeno. Para un funcionamiento óptimo del catalizador, se debe mantener la mezcla estequiométrica con  $\lambda$  de 0.995 a 1.005 y una temperatura de  $400^\circ\text{C}$  a  $800^\circ\text{C}$ , condiciones en las que se puede lograr reducir hasta el 98% de las emisiones en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{N}_2$ . En la Figura 4.5 se presenta la construcción de un catalizador de tres vías, indicando las partes principales y la oxidación y reducción de emisiones (Europa Lehrmittel, 2014).



Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

**Figura 4.5 Convertidor catalítico de tres vías**

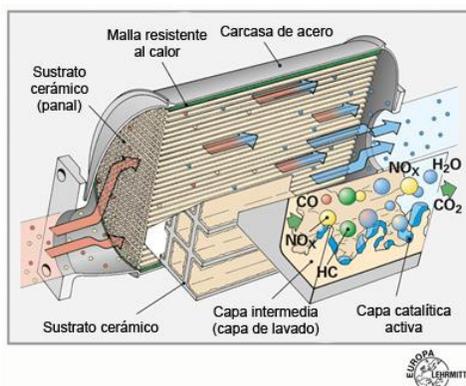
La Figura 4.6 muestra el comportamiento de la eficiencia del convertidor catalítico de tres vías. La imagen (a) muestra la composición de los gases antes de entrar al catalizador, donde se observa que los valores de  $\text{NO}_x$ , CO y HC son elevados en comparación con el (b), etapa en la cual los gases salen del catalizador. En (c) muestra una señal de voltaje en el sensor de oxígeno; cuando no existe variación, significa que el convertidor catalítico no funciona.



Fuente: Imágenes extraídas del libro Gasoline Engine Management Systems and Components (Bosch Automotive Professional, 2015)

### Figura 4.6 Eficiencia del convertidor catalítico de tres vías

El convertidor catalítico de doble vía es utilizado regularmente en motores diésel, llamado también “catalizador de oxidación” (DOC), debido a que este tipo de motores trabajan con exceso de oxígeno, generando unas tasas muy altas de óxidos de nitrógeno. Puesto que el catalizador de tres vías no tiene la capacidad de reducir los óxidos de nitrógeno, se instala un catalizador de doble vía para reducir los HC y el CO y se incluye otro sistema que se encargue de reducir los  $\text{NO}_x$ . Dentro del catalizador ocurren dos reacciones químicas debido a sus principales materiales de construcción: paladio y platino. La primera reacción es la oxidación del monóxido de carbono y la oxidación de hidrocarburos no quemados, convirtiendo el CO en  $\text{CO}_2$  y los HC en  $\text{H}_2\text{O}$ . La oxidación comienza a una temperatura específica entre  $170^\circ\text{C}$  y  $200^\circ\text{C}$ , temperatura en la que la tasa de oxidación se eleva a más del 90%. En la Figura 4.7 se observa un esquema de las partes principales de un catalizador de doble vía y la oxidación de las emisiones.

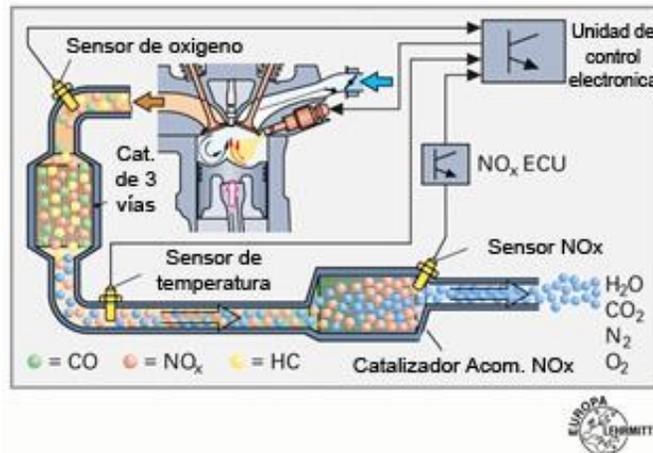


Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

### Figura 4.7 Convertidor catalítico de dos vías

## 4.2.2 Catalizadores acumuladores de óxidos de nitrógeno

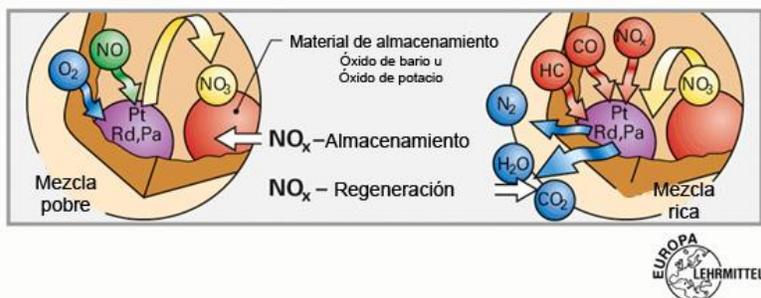
El catalizador acumulador de NO<sub>x</sub> almacena y convierte las emisiones de NO<sub>x</sub> presentes en la combustión pobre: es decir, cuando el motor opera con exceso de aire, donde  $\lambda > 1$ . Este componente se usa principalmente en motores a diésel y en los motores a gasolina de inyección directa. Durante la operación de un motor a gasolina diseñado para utilizar una mezcla aire-combustible pobre, es imposible que el catalizador de tres vías convierta los NO<sub>x</sub> que se generan en la combustión. En el catalizador de tres vías el CO y los HC se oxidan por el alto contenido de oxígeno de los gases de escape, por lo que ya no están disponibles como agentes reductores de los óxidos de nitrógeno. En la Figura 4.8 se presenta un esquema de la aplicación de un catalizador acumulador de NO<sub>x</sub>, ubicado después del catalizador de tres vías y cuya activación se debe a la cantidad de NO<sub>x</sub> y la temperatura de los gases (Europa Lehrmittel, 2014).



Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

**Figura 4.8 sistema control de emisiones de inyección directa en motores a gasolina**

Los materiales típicos de construcción son el platino, paladio y rodio, tal como el catalizador de tres vías; sin embargo, cuenta con aditivos especiales que permiten acumular los NO<sub>x</sub>. Los materiales acumuladores son óxido de bario (BaO) u óxido de potasio (KO). Durante la operación de mezcla pobre los materiales de almacenamiento son capaces de absorber los NO<sub>x</sub>, hasta que el sensor de NO<sub>x</sub> detecta cuando la capacidad de almacenamiento es excedida. Gracias al incremento periódico (de 1 a 5 segundos), los NO<sub>x</sub> se liberan y reducen a nitrógeno por el rodio con la ayuda de los constituyentes de gases de escape sin quemar, HC y CO. Así, de un 80% a 90% de óxidos de nitrógeno se reducen a temperaturas de operación de 250°C a 500°C. En la Figura 4.9, se muestra un esquema del almacenamiento y la regeneración de NO<sub>x</sub> (Europa Lehrmittel, 2014).



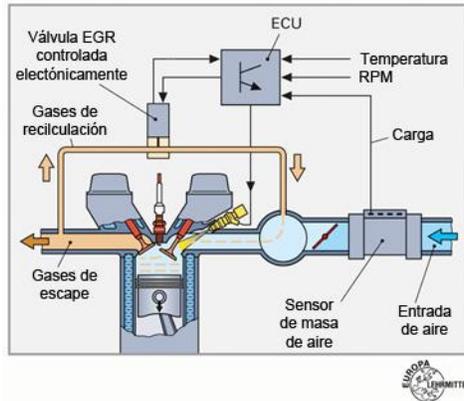
Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

**Figura 4.9 Almacenamiento y regeneración de NOx**

### 4.2.3 Recirculación de gases de escape

El sistema de recirculación de los gases de escape (EGR), consiste en recircular parte de los gases producto de la combustión hacia la admisión; es decir, reintroduciéndolos a los cilindros. El principal componente del sistema es la denominada “válvula EGR”, la cual se encarga de determinar el caudal de gases de escape que se reingresan a la cámara de combustión reduciendo, de esta manera, la concentración de oxígeno y la temperatura de combustión e incrementando el dióxido de carbono, disminuyendo la formación de óxidos de nitrógeno hasta un 40% en motores a gasolina y 60 % en motores a diésel. Sin embargo, los gases de recirculación que son enviados a la entrada de los cilindros contienen HC sin quemar, que se incrementan al ingresar de nuevo a la cámara, aumentando el consumo de combustible. Esto, ya que los dos factores que determinan el límite superior de la cantidad de recirculación de gases de escape son los NO<sub>x</sub> y los HC (máximo 20%), pudiendo reducir la eficiencia del motor si la tasa de cambio en el EGR es muy alta, incrementando el consumo de combustible y generando CO y HC.

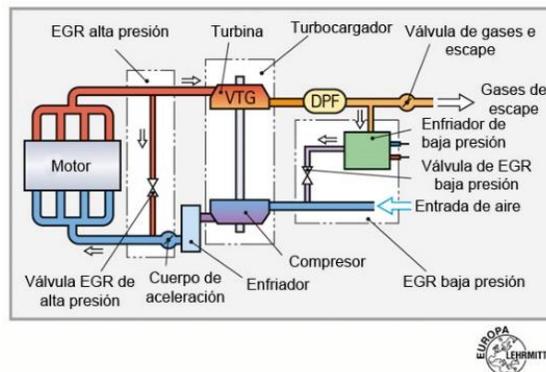
En motores a gasolina operando a temperatura normal y  $\lambda=1$ , el EGR se activa; sin embargo, si se tienen mezclas ricas de aire-combustible ( $\lambda < 1$ ) el EGR es desactivado ya que se forma poco NO<sub>x</sub> y una mayor cantidad de HC sin quemar y CO, por ejemplo, durante el ralentí, arranque en frío, aceleraciones y carga completa. La tasa de cambio del EGR es controlada en función a la temperatura del motor, la carga, la presión atmosférica y la velocidad rotacional del motor (RPM), todo monitoreado a través de la unidad de control electrónica (ECU). En función del comportamiento de esos parámetros se controla la apertura de la válvula de acuerdo con la proporción adecuada de recirculación de gases, proceso ilustrado esquemáticamente en la Figura 4.10, con la válvula EGR ubicada entre la salida de los gases de escape y la entrada de la cámara de combustión (Europa Lehrmittel, 2014).



Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

### Figura 4.10 Recirculación de gases de escape

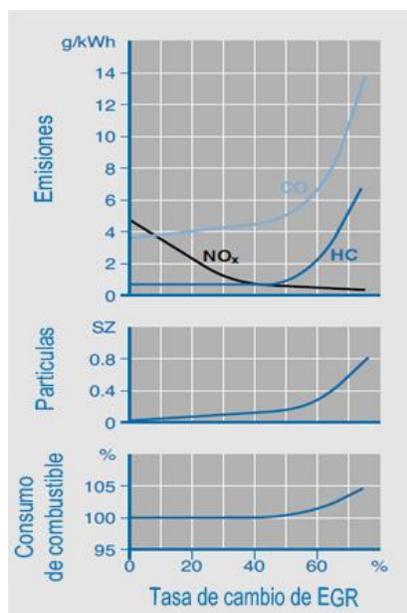
En motores a diésel el EGR reduce principalmente los  $\text{NO}_x$  y la temperatura pico en el motor, debido a que puede alcanzar una tasa de cambio cercano al 40% en volumen. Si el EGR alcanza valores por arriba de este valor, los  $\text{NO}_x$  continúan disminuyendo, aunque el diésel ya no se quema completamente por falta de oxígeno y se incrementan drásticamente los HC y las PM. El sistema de control de la válvula EGR se activa a cargas parciales y a temperatura normal de operación del motor, debido a los riesgos de sobrecalentamiento por la temperatura de los gases de escape. La recirculación no se activa con el motor frío o en periodos de aceleración, debido a que el EGR reduce la disponibilidad de oxígeno en los cilindros. En estos motores es común que se utilice un turbocargador, razón por la que son considerados de alta presión, ubicando el EGR antes de la turbina, mientras que a baja presión el EGR es instalado posterior de la salida de los gases de escape. En la Figura 4.11 se presenta el esquema de un sistema EGR de alta presión y baja presión. (Europa Lehrmittel, 2014)



Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

### Figura 4.11 Diagrama de EGR a alta y baja presión

En la Figura 4.12 se ilustra las gráficas de la generación de las emisiones (NO<sub>x</sub>, HC, CO, PM) y el comportamiento del consumo del combustible respecto a la tasa de cambio del EGR.



Fuente: Imágenes extraídas del libro Gasoline Engine Management Systems and Components (Bosch Professional Automotive, 2014)

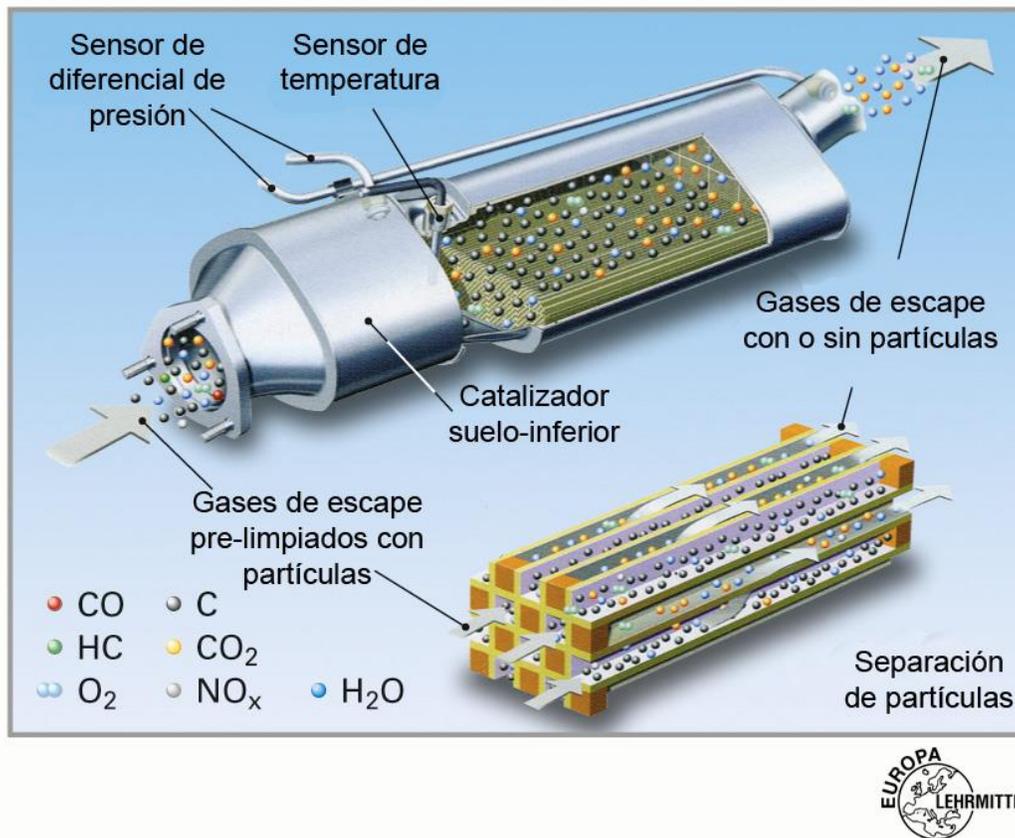
**Figura 4.12 Influencia de la tasa de cambio del EGR**

## 4.2.4 Filtro de partículas diésel

El filtro de partículas diésel (DPF) o filtro antipartículas (FAP), tiene como función principal atrapar el material particulado (PM) y las partículas de hollín que se generan durante la combustión incompleta, partículas que pueden ser menores a 1  $\mu\text{m}$ . Es un filtro hecho de carburo de silicio o cordierita, que tiene un gran número de canales paralelos, en su mayoría cuadrados, cuyo grosor de paredes es típicamente de 300 a 400  $\mu\text{m}$ . Cuando las partículas de hollín pasan a través de las paredes, se transportan a las paredes de cerámica de los poros por difusión, donde se adhieren. A medida que el filtro se satura con las partículas se va formando una capa de hollín en la superficie de las paredes del canal, que para mantener su cualidad de filtrado debe mantenerse limpio, por lo que las partículas depositadas deben ser eliminadas periódicamente. Esto se hace comúnmente por un proceso denominado regeneración, que implica la quema del hollín a una temperatura muy elevada que deja únicamente pequeños residuos. Un DPF puede capturar cerca del 95% de partículas contaminantes en los gases de escape (Consejo Internacional del Transporte Limpio, 2014).

El filtro de partículas es un elemento importante en la reducción de emisiones. Los DPF se integran comúnmente en el convertidor catalítico en los vehículos diésel, por su alta generación de emisiones de partículas, atrapándolas al forzar el paso

del gas de escape a través del filtro. La Figura 4.13 presenta un esquema de la construcción y funcionamiento de dicho filtro.



Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

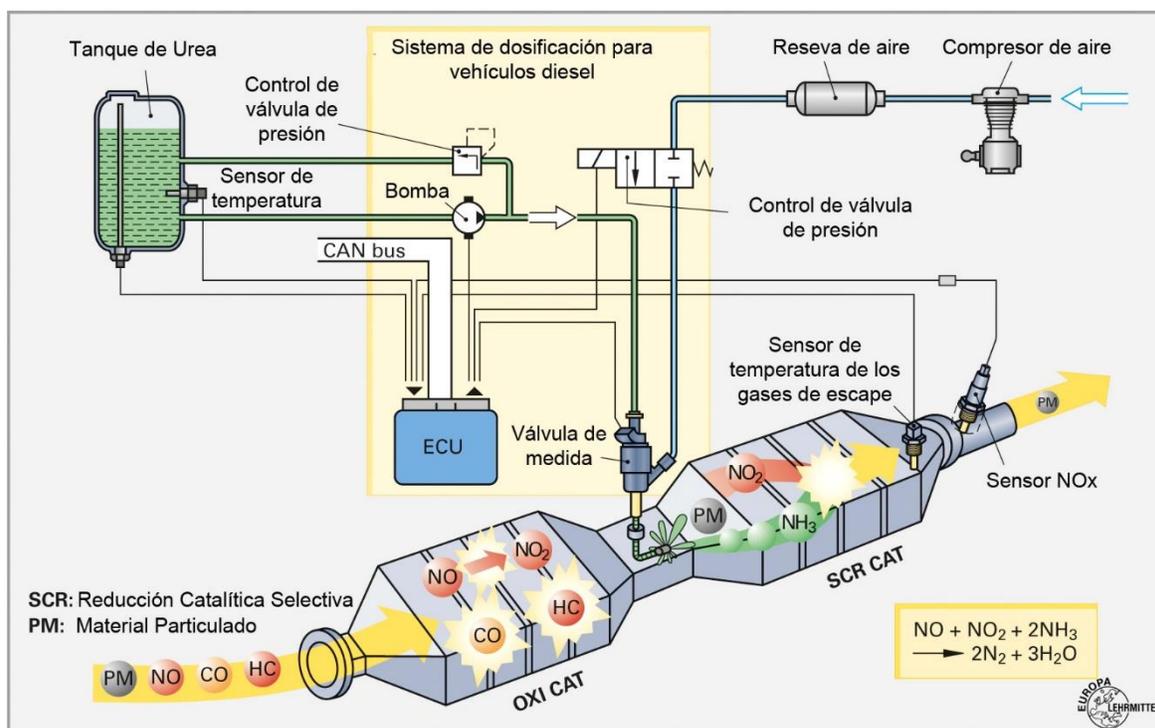
**Figura 4.13 Filtro de partículas diésel**

## 4.2.5 Reducción catalítica selectiva

El sistema de reducción catalítica selectiva (SCR, *Selective Catalytic Reduction*) es un catalizador que utiliza amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) como elemento reductor de los óxidos de nitrógeno, convirtiéndolos en agua y nitrógeno. Esta tecnología fue introducida en 2006 en Europa para vehículos diésel comerciales, permitiendo que los camiones pudieran cumplir con los límites más recientes establecidos en las normas Euro IV y Euro V. El SCR, en conjunto con un sensor que detecta los  $\text{NO}_x$ , realiza un análisis electrónico que detecta la presencia de  $\text{NO}_x$  en los gases de la combustión. Al detectar este contaminante, la ECU ordena la emisión de urea ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), que tiene como base el amoníaco. Esas moléculas de urea son disueltas en agua y, al llegar al catalizador, ocurre una reacción química donde se reducen los  $\text{NO}_x$  gracias al amoníaco el cual se convierte en vapor de agua y nitrógeno, reduciendo con este sistema más del 80% de los óxidos de nitrógeno en los gases de escape. La urea requerida para el SCR es conocida comercialmente como AdBlue (en Europa) o

DEF (Fluido para el sistema de escape, en Estados Unidos). Esta composición es regulada en el estándar DIN 70070 “El amoniaco (NH<sub>3</sub>) y el CO<sub>2</sub> de la solución de urea”, que de esta manera da lugar a nitrógeno y agua. El consumo de AdBlue es de 0.1 litro por cada 100 km o aproximadamente 1% al 3 % del tanque completo de combustible (Europa Lehrmittel, 2014).

Para tener una reducción total de emisiones y cumplir con las nuevas regulaciones que establecen los límites de emisiones se espera que, a la salida de la cámara de combustión del motor, los gases de escape pasen por un catalizador de oxidación diésel (DOC) previo y por un filtro partículas (DPF), entre los más importantes. Esto se representa en la Figura 4.14, en un esquema básico de un sistema de reducción catalítica selectiva (SCR) de los gases de escape de un motor de combustión interna. Es menester mencionar que el aprovechamiento de la aplicación de un sistema SCR parte del empleo de un combustible diésel de alta calidad, en el que el contenido de azufre es extremadamente reducido.



Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

**Figura 4.14 Reducción catalítica selectiva**

La Tabla 4.3 describe las medidas para reducir los contaminantes y su impacto en los motores diésel. Como se mencionó en estas secciones, existen medidas para controlar la generación de emisiones antes de que se produzca la quema de combustible, como es el control de inyección electrónico o, en su caso, sistemas como el EGR que recircula los gases para volver a quemarlos, son considerados como medida en la primera columna. La parte central de la gráfica describe las

emisiones clasificadas por el impacto, ya sea el incremento (↑) o disminución (↓) del contaminante debido a la tecnología aplicada. Si el impacto que puede tener en el gas es muy alto, el incremento se describe con doble flecha apuntando hacia arriba (↑↑); si el impacto es disminuido en muy alta proporción, de igual manera se expresa con dos flechas en dirección hacia abajo, (↓↓). En la última columna se describe la sugerencia para esa tecnología para reducir o eliminar los gases contaminantes.

**Tabla 4.3 Medidas para reducir las emisiones contaminantes de los motores diésel**

Medida	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM	CO <sub>2</sub>	Corrección
Tasa de EGR alta	↑	↑	↓	↑	↑	Filtro de partículas (DPF)
Adelantando el punto de inyección	↓	↓	↑↑	↓↓	↓	Reducción Catalítica Selectiva (SCR)
Retrasando el punto de inyección	↑	↑	↓↓	↑↑	↑	Filtro de partículas (DPF)
Alta temperatura de combustión	↓	↓	↑	↑	↓↓	Filtro de partículas (DPF), SCR

Fuente: Imágenes extraídas del libro Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014)

### 4.3 Aplicación de la tecnología respecto a la normativa vigente

Con el paso de los años las regulaciones ambientales dirigidas a los vehículos han sido cada vez más estrictas; consecuentemente, los fabricantes de vehículos han desarrollado tecnologías que controlen y reduzcan la formación de emisiones. Estas tecnologías permiten que los motores modernos cumplan con los requerimientos internacionales de emisiones contaminantes que, además, se han mantenido compatibles para no afectar significativamente la eficiencia ni la capacidad de entrega de energía de los motores. Así mismo, algunas de estas tecnologías son compatibles entre sí, cuya aplicación combinada permite eliminar los productos contaminantes generados durante la combustión, de manera que las emisiones emitidas por los escapes de los vehículos al aire sean productos inofensivos a la salud. Sin embargo, depende de cada país establecer las condiciones para que estos requerimientos se cumplan y se respeten.

En la Tabla 4.4 se presenta la información de la cronología de las normativas más aplicadas en motores diésel, que son la EPA y la EURO, ya que ha sido un tema de gran importancia por sus altos índices de contaminantes en México y en otros países. Además, se incluye la tecnología aplicada para cada una de las normativas en su respectiva versión.

**Tabla 4.4 Cronología de la normativa de emisiones y tecnología en vehículos a diésel**

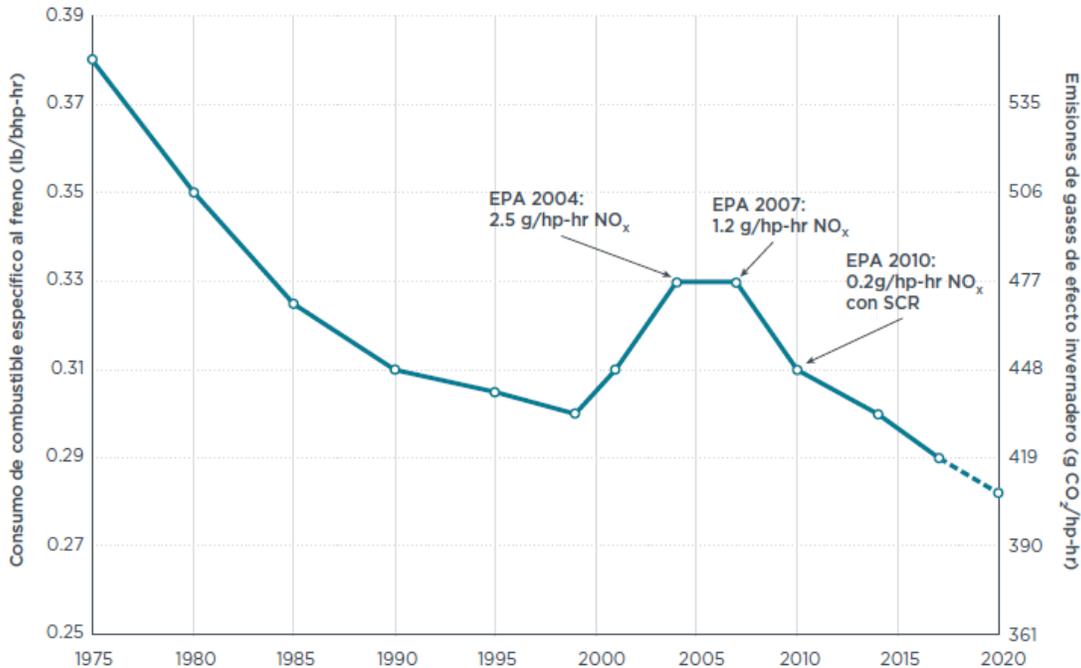
Tecnología	Normas								
	EPA				EURO				
	1998	2004	2007	2010	II	III	IV	V	VI
Turbocargador									
Bomba en línea o rotativa a una presión (P) de 1200 bar									
Retraso en inyección diésel									
Inyector unitario electrónico (common rail) P 1500-1700 bar									
Inyector unitario electrónico (common rail) P 1700-1900 bar									
Inyector unitario electrónico (common rail) P 1800-2000 bar									
Inyección variable									
Mejoras en combustión									
Rediseño del pistón									
EGR con enfriador									
SCR con catalizador de vanadio									
Catalizador de Oxidación Diésel (DOC)									
Turbocargador de geometría variable (VGT)									
Calibración y optimización del EGR									
Filtro de Partículas Diésel (DPF)									
Ajustes al SCR									
Sistema de inyección de alta presión (P > 2000 bar) y alta flexibilidad									
Combustión avanzada									
Integración con subsistemas EGR (como soporte al SCR)									
SCR-zeolitas									
DPF de pared									
Turbocargador de geometría variable (VGT) o doble etapa									

Fuente: Elaboración propia IMT con información del Consejo Internacional sobre Transporte Limpio

Uno de los beneficios colaterales más importantes de las modificaciones a la NOM-044 es la significativa mejora de la eficiencia en el uso de combustible del motor. Como se observa en la Figura 4.15, la eficiencia de los motores a diésel de vehículos pesados de carretera mejoró desde la década de los setenta, reflejándose como una dramática reducción en el consumo de combustible al freno (*brake specific fuel consumption, BSFC*) desde ese entonces hasta a finales del 2000. Entre 2004 y 2007, la aplicación de las normas EPA 2004 se incrementó debido a la aplicación del EGR, mostrando mejora en 2010 debido a la adopción del SCR. La tendencia continúa entre 2014 y 2017 por la implementación de los estándares de rendimiento de combustible. De acuerdo con esta misma figura, la eficiencia de los motores certificados con EPA 2010 mejoró aproximadamente un 6 % con respecto a los motores EPA 2004.

La implementación de los sistemas EGR solucionó la necesidad de reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> sin disminuir las de partículas, siendo estos sistemas una

alternativa para el control de emisiones que los SCR, pero tuvo como consecuencia una pérdida en la eficiencia del motor, incrementando el consumo de combustible. Así, la introducción de EPA 2004 repercutió en la pérdida de las mejoras en eficiencia que se habían logrado en los 15 años anteriores.



Fuente: Imágenes extraídas del documento "Actualización de la NOM-044", del Consejo Internacional sobre Transporte Limpio

#### Figura 4.15 Eficiencia histórica y proyectada en los motores a diésel de vehículos pesados

En Estados Unidos los fabricantes pronosticaron que al cumplir los estándares EPA 2010 la eficiencia de los motores mejoraría entre 2 % y 4 % con respecto a EPA 2004. Posteriormente, un estudio retrospectivo de la compañía Volvo mostró que el incremento histórico real en la eficiencia está más cerca del 6 %. Además, las investigaciones de Cummins revelan reducciones en costos de operación entre 2007 y 2010 de 4 % a 5 %, considerando tanto la reducción del consumo de combustible como el incremento en el costo. Con esto, en total se lograría un incremento de entre 7 % y 15 % en la eficiencia de los motores EPA 2010 con respecto a los EPA 2004, que todavía se venden en el mercado mexicano (Consejo Internacional del Transporte Limpio, 2014).

## 5 Comentarios

---

Desde la creación de regulaciones ambientales sobre las emisiones contaminantes que emiten los vehículos de carretera en la década de los setenta, se iniciaron importantes avances tecnológicos para mitigar la contaminación del aire. A lo largo de cada etapa se han establecido límites de emisiones más estrictos; sin embargo, es lamentable que a través de los años la generación de emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero se hayan incrementado como consecuencia del crecimiento poblacional, la industria, el parque vehicular y la deforestación de áreas verdes.

Los esfuerzos por mejorar la calidad del aire en México requieren de una adecuada política que asegure la calidad del aire incluyendo a los diferentes factores que garanticen resultados efectivos. Existen diversas recomendaciones que el gobierno podría aplicar para mejorar la calidad del aire en el país, como disminuir los costos fiscales para los vehículos más eficientes y aumentar de manera proporcional a los que no cumplan con las normas establecidas. Ésta sería una manera de promover la renovación del parque vehicular y la modernización de la tecnología en un amplio porcentaje. Sin embargo, paralelamente debe haber un serio compromiso y acción de disponibilidad y distribución de combustibles limpios y aditivos de urea, dejando de ser un impedimento para los usuarios dispuestos a emplear vehículos con la tecnología más actualizada. Otro aspecto muy importante de las nuevas tecnologías es reducir el consumo de combustibles fósiles, así como reducir la importación de vehículos alejados de estas tecnologías.

Cabe señalar que las normas vigentes mexicanas equivalen a las que Estados Unidos (2010) y Europa (2013) tenían hace años, provocando un retraso en la gestión de la calidad del aire en el país. Es evidente la necesidad de actualizar las normas y regulaciones aplicables en México (NOM-042 y NOM-044) al igual que otros países. Las actualizaciones deben considerar el uso de tecnologías que permitan el cumplimiento de límite de emisiones contaminantes similares a EPA 2010 o Euro VI, ya que los motores con esta tecnología emiten entre 80 y 90% menos contaminantes que la mayoría de los vehículos que en la actualidad circulan en el país. Congruente con esas tecnologías, aunque ya hay disponibilidad parcial en México, se debe asegurar un total abastecimiento y distribución de diesel de ultra bajo azufre (UBA) con contenido máximo de 15 ppm, cuyas características mejoran el proceso de combustión. Ello facilitará que los motores avanzados tecnológicamente tengan una mayor eficiencia, con menores emisiones que afecten negativamente la calidad del aire y al medio ambiente.

Los ajustes normativos promueven un mayor compromiso de fabricantes de motores con tecnologías actualizadas en la reducción de emisiones, así como armadores de

vehículos para equipar sus unidades con esa clase de motores. Esas tecnologías han mantenido niveles importantes de eficiencia, incrementando el rendimiento del combustible y reduciendo costos de operación, principalmente en vehículos de servicio pesado.

## Bibliografía

---

INECC. (2017). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2016, México*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos, Ciudad de México. Recuperado el Septiembre de 2018, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/294715/INFORME\\_NACIONAL\\_DE\\_CALIDAD\\_DEL\\_AIRE\\_2016.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/294715/INFORME_NACIONAL_DE_CALIDAD_DEL_AIRE_2016.pdf)

Academic Press. (oct de 1998). *Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines Pollutant Formation and Control*. United States of America: Eran Sher. Recuperado el Julio de 2018

Bosch Automotive Professional. (2015). *Gasoline Engine Management Systems and Components*. Friedrichshafen, Germany: Konrad Reif.

Bosch Automotive Professional. (2015). *Gasoline Engine Management Systems and Components*. Alemania, Germany: Konrad Reif.

Bosch Professional Automotive. (2014). *Diesel Engine Management Systems and Components*. Alemania: Konrad Reif.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (15 de 06 de 2018). *Ley Federal de Metrología y Normalización*. Recuperado el 11 de 2018, de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/130\\_150618.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/130_150618.pdf)

Consejo Internacional del Transporte Limpio. (Diciembre de 2014). *Regulaciones sobre emisiones de vehículos pesados en México*. Recuperado el Noviembre de 2018, de [https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate\\_NOM-044\\_20141222\\_ESP.pdf](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_NOM-044_20141222_ESP.pdf)

Diario Oficial de la Federación . (7 de 9 de 2005). *Norma Oficial Mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003*. Obtenido de [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=2091196&fecha=07/09/2005](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2091196&fecha=07/09/2005)

Diario Oficial de la Federación. (26 de 11 de 2014). *Norma Oficial Mexicana NOM-047-SEMARNAT-2014*. Obtenido de Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <http://dof.gob.mx/normasOficiales.php>

Diario Oficial de la Federación. (10 de 06 de 2015). *NOM-041-SEMARNAT-2015*. Obtenido de Norma Oficial Mexicana NOM-041-SEMARNAT-2015, Que

establece los límites máximos permisibles de emisión de gases:  
<http://dof.gob.mx/normasOficiales.php>

Europa Lehrmittel. (2014). *Modern Automotive Technology* (Vol. 2th). Stuttgart, Alemania, Alemania: R. Gscheidle, Studiendirektor, Winnenden.

Global Carbon Atlas. (2017). *CO2 emissions*. Recuperado el 2018, de <http://www.globalcarbonatlas.org/es/CO2-emissions>

Gómez, C. L. (2009). *Propuesta metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades de la República Mexicana*. Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro. Recuperado el Septiembre de 2018, de <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt322.pdf>

INECC. (2005). *Los vehículos automotores como fuentes de emisión*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/618/vehiculos.pdf>

INECC. (18 de Mayo de 2018). *Gases y compuestos de efecto invernadero*. Recuperado el Junio de 2018, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático : <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>

INECC. (26 de Marzo de 2018). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero*. Recuperado el Agosto de 2018, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/312045/INEGYCEI6CN\\_26\\_marzo\\_2018.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/312045/INEGYCEI6CN_26_marzo_2018.pdf)

INEGI. (2018). *Parque vehicular*. Recuperado el Septiembre de 2018, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Estadísticas de Vehículos de Motor Registrados.: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/vehiculos/>

Mercedes Benz. (1991). Los vehículos comerciales y el medio ambiente. *Mercedes-Benz y usted protegiendo nuestro aire*, 27.

Organización Mundial de la Salud. (2 de Mayo de 2018). *Calidad del aire y salud*. Obtenido de Datos y cifras: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Robert Bosch. (2000). *Automotive Handbook 5th Edition*. Stuttgart, Germany. Recuperado el Agosto de 2018

Robert Bosch. (2010). *Handbook of diesel engines*. Alemania: Springer.

Robert Bosch. (2014). *Automotive Handbook*. Alemania: Staff.

- SEMARNAT. (2013). *Calidad de aire: Una práctica de vida*. Recuperado el Septiembre de 2018, de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales:  
<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>
- SEMARNAT. (2017). *Consulta temática* . Recuperado el Agosto de 2018, de Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales:  
[http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_GLOS\\_AIRE&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_GLOS_AIRE&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce)
- Sistema de Información Energética-SENER. (2018). *Balance Nacional de Energía: Consumo final de energía por sector*. Obtenido de Secretaría de Energía. Dirección General de Planeación e Información Energéticas:  
<http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas>
- Society of Automotive Engineers. (1992). *Truck Systems Design Handbook*. United States of America: SAE PT-41.
- Web Japan. (11 de 2018). *Web Japan*. Obtenido de Cuestiones Medioambientales:  
[https://web-japan.org/factsheet/es/pdf/es45\\_environment.pdf](https://web-japan.org/factsheet/es/pdf/es45_environment.pdf)





Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”  
Parque Tecnológico San Fandila  
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México  
CP 76703  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad  
certificada bajo la norma ISO 9001:2015