

Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de la Energía  
Mención en Sistemas de Producción de Potencia

# **Estudio bibliográfico del tratamiento de gases de escape en motores de combustión interna alternativos.**

Autor:  
Francisco Javier Gallego Sosa

Tutor:  
Miguel Torres García  
Profesor titular

Dep. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2015

# Resumen

---

La contaminación es una de las mayores preocupaciones de la sociedad contemporánea. El desarrollo de la tecnología es una de las causas, pero también puede ayudar a solucionar parte del problema.

Las emisiones contaminantes de los motores de combustión interna alternativos; en concreto, el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos sin quemar y las partículas son una parte importante de la contaminación total liberada a la atmósfera. Las emisiones de los vehículos están limitadas por la normativa en la mayoría de los países del mundo.

Son muchos los procedimientos y sistemas usados para cumplir esta normativa, que afectan desde la composición del combustible hasta el conducto de escape de los vehículos, pasando por los sistemas de formación de la mezcla. A las medidas orientadas a minimizar la formación de contaminantes se les denomina soluciones activas, y a aquellas destinadas a contener las emisiones de dichos contaminantes una vez formados, soluciones pasivas.

La viabilidad de las soluciones activas depende sobre todo del tipo de combustible y del ciclo descrito por el motor. Por otra parte, el empleo de una u otra solución pasiva suele depender, entre otros factores, del contaminante en concreto cuyas emisiones se desean reducir y de la composición y temperatura de los gases de escape.

En este documento se recopilan la mayoría de mecanismos destinados a minimizar las emisiones de gases contaminantes, y se clasifican según el tipo de motores con los que operan.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Objetivos</b>	<b>4</b>
<b>3 Caracterización de las emisiones y antecedentes de las mismas</b>	<b>7</b>
3.1 <i>Contaminación atmosférica</i>	7
3.1.1 Principales contaminantes atmosféricos	7
3.1.2 Efectos de los contaminantes	15
3.2 <i>Metodología de estimación de emisiones</i>	17
3.3 <i>Normativa reguladora</i>	18
3.3.1 Europea	19
3.3.2 No europea	21
3.3.3 Emisiones reales	25
3.4 Antecedentes	27
<b>4 Sistemas de postratamiento de gases de escape</b>	<b>30</b>
4.1 <i>Reactores</i>	30
4.1.1 Reactores térmicos	30
4.1.2 Reactores catalíticos	30
4.1.3 Reactores químicos	37
4.2 <i>Filtros</i>	38
4.2.1 Filtros químicos	39
4.2.2 Filtros físicos	39
<b>5 Metodología de reducción de emisiones en MECH</b>	<b>43</b>
5.1 <i>Soluciones activas</i>	43
5.1.1 Inyección indirecta	43
5.1.2 Inyección directa	45
5.2 <i>Soluciones pasivas</i>	46
5.2.1 Inyección indirecta	47
5.2.2 Inyección directa	47
<b>6 Metodología de reducción de emisiones en MEC</b>	<b>49</b>
6.1 <i>Soluciones activas</i>	50
6.2 <i>Soluciones pasivas</i>	53
<b>7 Desarrollo futuro</b>	<b>56</b>
<b>8 Conclusiones</b>	<b>59</b>

<b>Referencias</b>	<b>61</b>
<b>Enlaces web visitados</b>	<b>62</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3-1: Límites de emisiones (en g/km) según tipo de contaminante y normativa para vehículos de categoría M1.	20
Tabla 3-2: Límites de emisiones con los ciclos de prueba ESC y ELR	21
Tabla 3-3: Límites de emisiones con los ciclos de prueba ETC.	21
Tabla 3-4: Límite de valores permitidos en Argentina para varias emisiones contaminantes de MECH.	24
Tabla 4-1: Tipos de contaminantes tratados según motor y tecnología utilizada.	41
Tabla 6-1: Tasas de emisión en término medio para distintos tipos de vehículos a ralentí.	52
Tabla 6-2: Tasas de emisión a ralentí en término medio para distintos tipos de vehículos pesados Diesel según categoría GVW (Gross Vehicle Weight).	53



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1: Composición de los gases de escape según el ciclo descrito por el motor: Otto (izquierda), Diesel (derecha).	2
Figura 3-1: Distribución de emisiones de óxido nitroso según su origen.	9
Figura 3-2: Emisiones de óxido nitroso desde 1990 hasta 2012 en millones de toneladas equivalentes de CO <sub>2</sub> .	10
Figura 3-3: Efecto del monóxido de carbono en la hemoglobina.	11
Figura 3-4: Concentración de gases de escape en función del parámetro lambda.	12
Figura 3-5: Número, superficie y masa del material particulado atmosférico en función de su distribución granulométrica (según Dr. H C Hasson).	13
Figura 3-6: Requisitos de contenido de azufre en el combustible para las distintas regulaciones ambientales.	14
Figura 3-7: Efectos de la inhalación de aire contaminado sobre la salud.	17
Figura 3-8: Ciclos urbano (Parte 1) y extraurbano (Parte 2) de homologación de emisiones para vehículos ligeros.	18
Figura 3-9: Tendencia del contenido de azufre (en ppm) en el combustible Diesel en Japón.	23
Figura 3-10: Ciclo de ensayo usado en Argentina para la homologación de emisiones de vehículos con MECH.	24
Figura 3-11: Áreas geográficas de validez de las diferentes legislaciones sobre gases de escape para turismos. (Bosch, 2005)	25
Figura 3-12: Comparación entre la media de emisiones de NO <sub>x</sub> en vehículos de gasolina y Diesel, de pasajeros y comerciales ligeros con los límites establecidos en la normativa europea para su homologación.	26
Figura 3-13: Emisiones de NH <sub>3</sub> de vehículos Diesel y gasolina, tanto híbridos como convencionales.	27
Figura 4-1: Estructura interior de un reactor catalítico.	31
Figura 4-2: Estructura interior de los catalizadores de monolito metálico (izquierda) y cerámico (derecha).	31
Figura 4-3: Representación esquemática del recubrimiento de un catalizador.	32
Figura 4-4: Vista esquemática ampliada del interior de un monolito de tipo cerámico.	32
Figura 4-5: Estructura interna de un catalizador.	33
Figura 4-6: Despiece de un catalizador.	33
Figura 4-7: Esquema de la ubicación de las sondas lambda en un vehículo.	35
Figura 4-8: Representación esquemática del interior de un catalizador de tres vías durante su funcionamiento.	35
Figura 4-9: Reacciones que tienen lugar en el interior del catalizador de tres vías y concentraciones de cada contaminante en función del parámetro lambda.	36
Figura 4-10: Sección ampliada de un catalizador de tres vías con sus partes de diferentes colores. Desde el interior hacia el exterior: sustrato cerámico (gris), paladio (azul) y rodio (rojo).	37

Figura 4-11: Detalle de la adición de AdBlue a la corriente de gases de escape.	38
Figura 4-12: Sistema de reducción catalítica selectiva.	38
Figura 4-13: Funcionamiento básico de un sistema de acumulación de NOx.	39
Figura 4-14: Filtro de monolito cerámico.	40
Figura 4-15: Filtro de partículas seccionado incorporado en un motor Scania Euro 6.	41
Figura 5-1 Concentración de gases contaminantes en función del dosado.	43
Figura 5-2: Rendimiento de la conversión de NOx, CO y HC con un catalizador de tres vías en función de la inversa del dosado (parámetro lambda).	44
Figura 5-3: Esquemas de sistemas de recirculación de gases de escape de alta (arriba) y baja (abajo) presión.	46
Figura 6-1: Dieselización del parque de vehículos ligeros en Europa entre 1996 y 2006.	49
Figura 6-2: Estrategias de combustión para lograr bajas emisiones de NOx en el diagrama temperatura – dosado.	51
Figura 6-3: Vista esquemática del sistema de gestión del motor y los gases de escape	53
Figura 6-4: Línea de escape de un turismo equipado con filtro de partículas y catalizadores de oxidación y SCR.	54
Figura 7-1: Esquema de funcionamiento del catalizador de cuatro vías.	57





# 1 INTRODUCCIÓN

---

**L**os motores de combustión interna alternativos (MCIA) se desarrollaron de forma exponencial gracias a la producción de petróleo a gran escala, a partir del siglo XIX. Mientras algunos de ellos han tenido poca repercusión en la sociedad, los más importantes se fabrican a día de hoy a gran escala, y se suelen clasificar en dos grupos: motor de encendido provocado (MEP) y motor de encendido por compresión (MEC).

El motor de encendido provocado, de encendido por chispa (MECH), o más comúnmente conocido como motor de gasolina fue fabricado por primera vez en 1876 por Nikolaus August Otto. Su creador dio nombre al ciclo de trabajo que describen estos motores. Sin embargo, no se utilizaron en automóviles hasta que, diez años más tarde, Karl Benz los tuviera en cuenta en sus primeros prototipos.

Por otra parte, el motor de encendido por compresión, extensamente conocido como motor Diesel, fue inventado por el ingeniero Rudolf Diesel en 1883, aunque tuvo que esperar hasta 1897 para que la empresa para la que trabajaba (la legendaria MAN), produjera el primero de ellos.

Observando la trayectoria que han seguido ambos tipos de motores desde sus inicios hasta nuestros días, son apreciables el abaratamiento que han experimentado o la reducción de tamaño; pero los cambios más significativos son la mejora del rendimiento y el aumento de la potencia, ambos fenómenos impulsados por la sobrealimentación y la inyección electrónica entre otras mejoras.

Sin embargo, desde hace unos años, se viene observando un ligero cambio en esta trayectoria: se ha dejado de perseguir la maximización de la potencia para buscar motores más eficientes y menos contaminantes.

Hay diversas causas que explican este cambio de objetivos en las compañías. Por un lado, ambos motores están ya muy perfeccionados, de manera que resulta complicado mejorar su funcionamiento con la tecnología disponible actualmente. Además, a partir de la crisis del petróleo (1973), se presta más atención al consumo de combustible. Por otra parte, ha aumentado el apoyo social a las organizaciones ecologistas y la sociedad está cada vez más concienciada con los problemas medioambientales; así que hay corrientes que señalan la expansión generalizada en el uso de estos motores como una de las causas antropogénicas del cambio climático.

La presión social a menudo hace eco en la política, de manera que desde la aprobación del protocolo de Kioto en 1997, los gobiernos de los países industrializados han puesto cotas a las emisiones permitidas en multitud de campos, incluyendo el de los MCIA. En cuanto a emisiones contaminantes de los vehículos, existen normativas anteriores, como la Euro 1, que entró en vigor en 1992 en Europa. En California, las emisiones contaminantes se vienen controlando desde la década de los 70.

Según va avanzando la tecnología, es posible fabricar motores cada vez más limpios y eficientes sin penalizar en gran medida su potencia y rendimiento. Estos avances suelen ir acompañados de una vuelta de tuerca en las restricciones establecidas por los gobiernos. De esta forma, se marcan unos objetivos claros para el desarrollo sin perjudicar demasiado el crecimiento económico de los países. No obstante, es evidente que la limitación de emisiones supone un lastre para los países industrializados: basta con analizar la directa relación existente entre los niveles de emisión de contaminantes y el crecimiento económico de los países.

Los gases contaminantes emitidos por un motor Diesel son diferentes a los que emite uno de gasolina. En cada uno, los gases de escape tienen una composición y concentración determinada. Asimismo los mecanismos de reducción de emisiones variarán según la naturaleza de las mismas. Por todo esto es importante conocer el funcionamiento básico de los motores y las diferencias entre unos y otros:

Según su funcionamiento, pueden ser de dos o cuatro tiempos. Ambos se usan a gran escala en el transporte, pero los primeros tienen un campo de aplicación mucho más reducido (generalmente a motocicletas de pequeña cilindrada o baja relación peso-potencia: trial, cross...). Los motores Diesel de dos tiempos no están muy extendidos, quedando limitado su uso a algunos buques de gran tonelaje.

Los motores de gasolina son por lo general más simples y baratos que los Diesel. Tienen multitud de aplicaciones: karts, motosierras, grupos electrógenos... Los motores Diesel, por otra parte, suelen funcionar en vehículos de mayor tamaño, que precisan mayor potencia. Se usan extensamente en todoterrenos, camiones, barcos...

Este trabajo se centra en el estudio de motores de cuatro tiempos, que son los más empleados en los automóviles.

Dentro de este ámbito, otra clasificación posible podría ser el tipo de inyección: tanto los motores Diesel como los de gasolina pueden ser de inyección directa o indirecta. En los primeros, el combustible se inyecta directamente en el cilindro en un instante determinado, generalmente definido por el ángulo de giro del cigüeñal respecto del punto muerto superior del cilindro en cuestión. [Aunque lo ideal sería que la explosión fuese instantánea al principio de la carrera de expansión, el combustible tarda en arder desde que se inyecta en el cilindro (tiene que mezclarse y quemarse por completo), por lo que se suele adelantar su entrada respecto del PMS.]

En los motores de inyección indirecta, el combustible se inyecta en una precámara anexa al cilindro. En este caso, el combustible se encuentra ya mezclado con el comburente a su llegada al cilindro. Además, ambos volúmenes están unidos por una sección estrecha, en la que la mezcla se acelera hasta una velocidad próxima a la del sonido, favoreciendo así el proceso de mezcla de ambos fluidos. La consecuencia es una combustión más rápida en el cilindro.

Otro elemento importante son las válvulas. Cada cilindro debe tener al menos dos (una de admisión y otra de escape), aunque es frecuente ver motores de cuatro válvulas por cilindro, para facilitar ambos procesos.

El combustible usado en motores de encendido provocado (gasolina) es una mezcla de hidrocarburos muy reactiva. A diferencia del gasoil, arde a presión atmosférica con una aportación inicial de energía, por lo que su manejo y almacenamiento es más delicado. En motores de gasolina, además, se suele trabajar con una mezcla estequiométrica de aire y combustible. Esto tiene una consecuencia fundamental a la hora de tratar los gases de escape, ya que estos serán en su mayoría dióxido de carbono, agua y nitrógeno molecular. En motores Diesel, la mezcla es mucho más pobre (sobra aire para la combustión completa) por las dificultades que presenta su combustión (y mezcla) frente a la de la gasolina. Además, con esto se consigue aumentar el rendimiento, ya que se reduce el consumo de combustible. Como consecuencia, aparecerá también oxígeno en los gases de escape. Por ello, es frecuente en motores Diesel recircular los gases de escape para minimizar el exceso de oxígeno, que, junto a la elevada temperatura, favorece la formación de óxidos de nitrógeno.

Por lo general, las emisiones de los motores de encendido provocado suelen ser mayores que las de los Diesel, aunque éstas últimas son más difíciles de controlar, y la tecnología necesaria para ello suele ser más costosa. En la figura 1-1 se muestra la composición de los gases de escapes de ambos motores a rasgos generales:

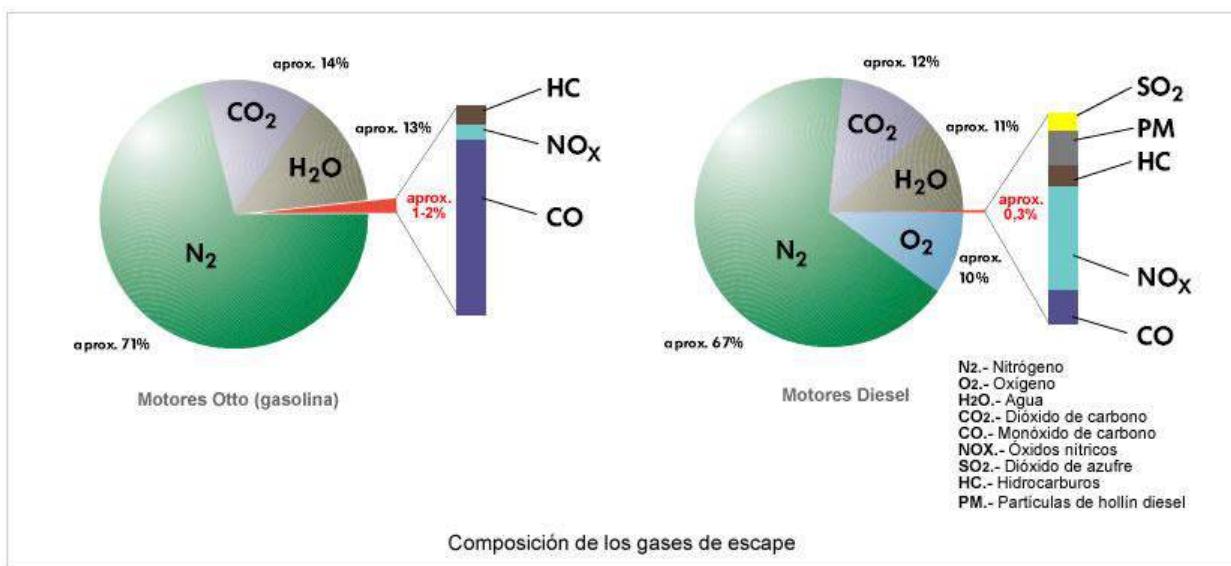


Figura 1-1: Composición de los gases de escape según el ciclo descrito por el motor: Otto (izquierda), Diesel (derecha).



## 2 OBJETIVOS

**E**n este documento se pretende, en primer lugar, detallar el efecto de los MCIA en el medio ambiente, concretamente en cuanto a emisiones de gases contaminantes y partículas.

Para ello, por un lado, se hará una caracterización de los contaminantes atmosféricos, especialmente de las emisiones de los motores de combustión interna alternativos, haciendo especial hincapié en aquellos usados en vehículos. Posteriormente, se describirán los efectos más importantes que conlleva la emisión de cada uno de ellos a la atmósfera.

El objetivo final es hacer una recopilación de los métodos aplicables para reducir las emisiones de los MCIA. Para ello, se estudiarán en primer lugar los mecanismos de formación de cada contaminante durante la operación de cada tipo de motor, diferenciando entre quelllos de encendido por chispa y los de encendido por compresión, en ambos casos de 4 tiempos. De esta forma, se detallarán, para cada uno de ellos, una serie de actuaciones posibles para minimizar la formación de los mencionados contaminantes.

En segundo lugar, se hará una descripción de los mecanismos usados para minimizar las emisiones una vez se han formado los contaminantes, también diferenciando según el tipo de motor empleado. Dichos mecanismos se denominan frecuentemente sistemas postratamiento.

También se pretende dar una visión de futuro acerca de las tendencias previstas en los dispositivos que se usan para el control de emisiones.





# 3 CARACTERIZACIÓN DE LAS EMISIONES Y ANTECEDENTES DE LAS MISMAS

---

**E**l presente documento trata la contaminación producida por la emisión de gases y partículas durante el funcionamiento de los MCIA, quedando fuera otros tipos de contaminación, como la acústica.

Para poder hablar de la reducción de emisiones contaminantes es imprescindible conocer previamente los gases contaminantes. A tal efecto, se hace en las páginas siguientes una descripción de la contaminación atmosférica y los principales agentes contaminantes, tratando con mayor grado de detalle aquellas emisiones ligadas a los motores de combustión interna alternativos.

## 3.1 Contaminación atmosférica

Se define la contaminación atmosférica como la presencia de materia o energía que pueda tener efectos nocivos en la naturaleza (y por ende en los seres humanos). Es de reseñar que una misma sustancia puede o no ser contaminante en función de los efectos que produce, lo que dependerá de su concentración, localización en la atmósfera, etc. Un ejemplo típico es el ozono: gas tóxico contaminante cuando se encuentra en la troposfera, y sin embargo beneficioso (imprescindible) cuando se ubica en la estratosfera.

Según su origen, puede clasificarse en contaminación natural (la que se desprende en erupciones volcánicas, incendios forestales...) o antropogénica (derivada de la actividad de los seres humanos).

Se denominan contaminantes primarios a aquellos que son vertidos a la atmósfera directamente desde los focos emisores. Por otra parte, a aquellos que son derivados de los primarios se les denomina contaminantes secundarios, o efectos de los contaminantes primarios.

### 3.1.1 Principales contaminantes atmosféricos

Los contaminantes primarios más importantes son:

#### 3.1.1.1 Compuestos de nitrógeno (NOx)

El óxido nítrico (NO) es un gas incoloro que, cuando reacciona con el ozono, forma el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>); de color rojizo. Se generan principalmente debido a la presencia del nitrógeno del aire en procesos de combustión. El óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) se genera en procesos industriales a elevada temperatura, aviones a reacción, fertilizantes...

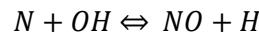
Provocan problemas respiratorios y corrosión de materiales. Además, es precursor de la formación de ozono troposférico, y del denominado “smog fotoquímico” cuando se combina con la niebla, humo y vapores.

#### Óxido nítrico (NO)

Pueden distinguirse tres tipos según el mecanismo de formación:

- NO-térmico: consiste en la formación de NO a partir del nitrógeno atmosférico. Este mecanismo es el predominante a elevadas temperaturas y depende fuertemente de este parámetro. Fue Zeldovich quien propuso el conjunto de reacciones en cadena que rigen este mecanismo en la década de los 40. Como puede observarse, se parte de radicales O (oxígeno atómico), por la elevada energía de activación de

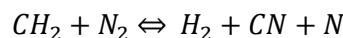
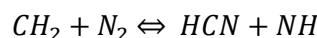
la reacción entre ambos compuestos moleculares.



Esta última reacción simula la disminución en la formación de NO que se da con el aumento del dosado, ya que el combustible sin quemar compite también por los radicales OH, disminuyendo así la importancia de esta reacción.

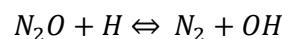
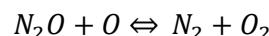
Otra de las contribuciones de Zeldovich fue el desacoplamiento de las reacciones de formación y destrucción del NO, debido a la disparidad de velocidades de ambas reacciones. Consecuentemente, se suele considerar que las reacciones de oxidación predominan en el seno de la llama, y las de formación, en la postcombustión.

- NO-súbito, prompt o de Fenimore: surge cuando se demuestra experimentalmente que la formación de óxido nítrico no puede explicarse únicamente con el mecanismo de Zeldovich. Este mecanismo, a diferencia del anterior, no depende de la temperatura, y solamente explica la formación de alrededor del 5% del total de NO en motores Diesel. Fenimore sugiere que los compuestos hidrocarbonados presentes en la atmósfera de reacción también contribuyen a la formación de NO mediante especies intermedias (cianos y aminas). A continuación se detallan algunas de estas reacciones:



De todas ellas, la primera es la dominante. Cabe destacar otro factor importante conocido como superequilibrio de las especies O y OH. Como es de esperar, durante la combustión en MCIA se dan concentraciones muy elevadas de estos radicales debido a las elevadas temperaturas que se alcanzan. Esto hace que se favorezca la formación de NO-térmico en mezclas estequiométricas, y de NO-súbito en mezclas ricas.

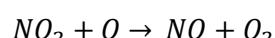
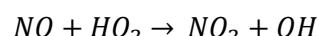
- Mecanismo debido al N<sub>2</sub>O intermedio: se da a temperaturas menores de 1500 K, generalmente con mezclas pobres. Se conocen varios procedimientos. Uno de los más conocidos es el siguiente, propuesto por Lavoie et al:



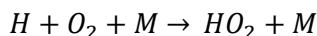
Este mecanismo tiene una influencia importante en los MEC en los que se pretende reducir las emisiones de NO bajando la temperatura de combustión mediante técnicas como el EGR.

#### Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

Es más reactivo que el NO a la hora de formar smog fotoquímico y lluvia ácida. Además, puede llegar a representar el 30% de los NO<sub>x</sub> emitidos por un motor Diesel. Las reacciones en las que interviene son las siguientes:



El radical HO<sub>2</sub> se forma en regiones de baja temperatura mediante la reacción:



La primera reacción (de formación) se da cuando las moléculas de NO viajan a zonas de baja temperatura en las que abunda el radical anterior. Por el contrario, las reacciones de destrucción del NO<sub>2</sub> se dan en zonas de elevada temperatura, donde la concentración de los radicales H y O es elevada. Por tanto, se puede concluir que la formación de NO<sub>2</sub> está estrechamente relacionada con la temperatura; aumentando ésta a temperaturas bajas, cuando se congelan las reacciones de destrucción. Un fenómeno interesante se produce en los aparatos de medida a la hora de medir la concentración de dióxido de nitrógeno, ya que éstos suelen estar a una temperatura inferior a la de los gases, por lo que la concentración de NO<sub>2</sub> se dispara en las proximidades de los mismos.

### Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).

Además de una especie intermedia en el tercer mecanismo de formación de NO explicado anteriormente, el N<sub>2</sub>O constituye en sí mismo otra de las emisiones importantes de óxidos de nitrógeno por ser 296 veces más reactivo que el CO<sub>2</sub> en su contribución al calentamiento global y por su facilidad para acceder al ozono estratosférico y participar en su destrucción. (Payri & Desantes, 2011)

Aproximadamente el 40% de las emisiones de óxido nitroso tienen origen antropogénico. De éste 40%, sólo el 4% proviene del transporte, como ilustra la figura 3-1:

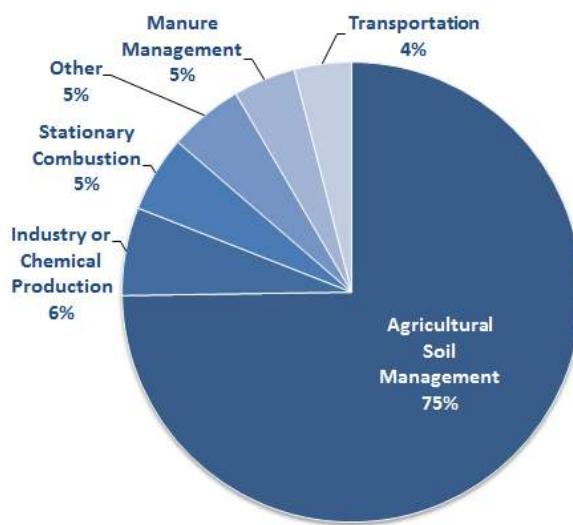
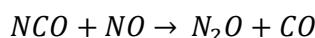
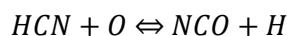
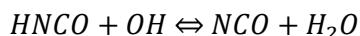
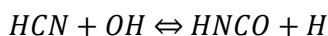


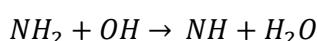
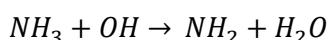
Figura 3-1: Distribución de emisiones de óxido nitroso según su origen.

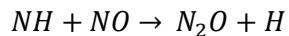
Fuente: <http://epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/n2o.html#Reducing>

A diferencia del resto de óxidos de nitrógeno, el nitroso se forma a partir del nitrógeno contenido en el combustible. Estos combustibles emiten volátiles como el HCN y el NH<sub>3</sub>, precursores de las siguientes reacciones:



El HCN puede producir NH<sub>3</sub>, que se combina con el radical OH para formar finalmente N<sub>2</sub>O; como se muestra en la siguiente cadena de reacciones:





La producción de  $N_2O$  se ve favorecida con la reducción de la temperatura, consecuencia del empobrecimiento de la mezcla. Por tanto, en los sistemas para reducir las emisiones de  $NO_x$  que, generalmente, utilizan esta estrategia, pueden aumentar las de  $N_2O$ .

Las emisiones (totales) de óxido nitroso han aumentado alrededor de un 3% entre 1990 y 2012. En la figura 3-2 se representan dichas emisiones a lo largo de estos años:

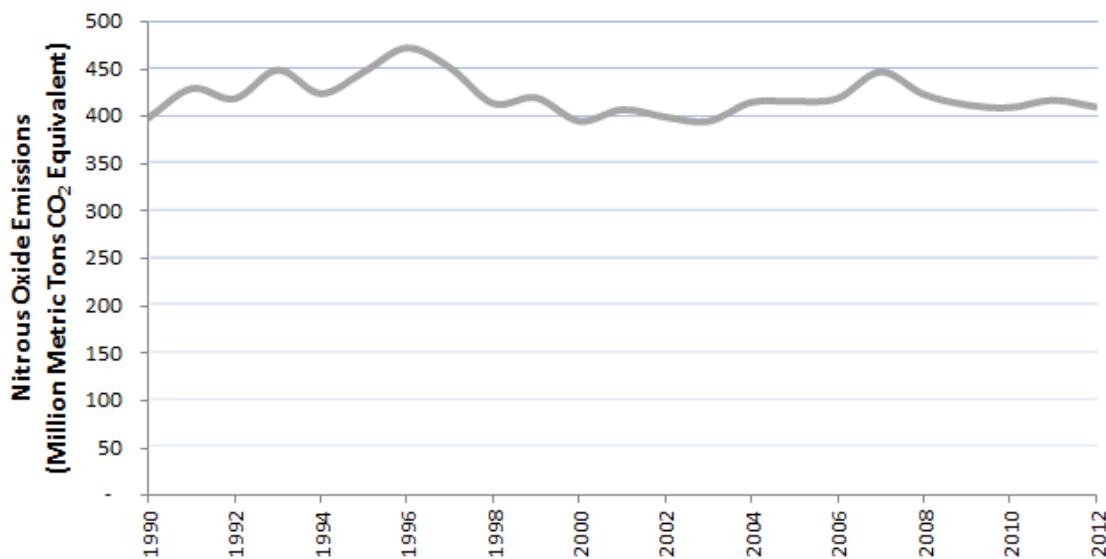


Figura 3-2: Emisiones de óxido nitroso desde 1990 hasta 2012 en millones de toneladas equivalentes de  $CO_2$ .

Fuente: <http://epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/n2o.html#Reducing>

El óxido nitroso, sobre todo, es producido por microbios del suelo en los procesos de nitrificación y desnitrificación naturales y agrícolas, pero también, en menor medida, por la quema de combustibles fosiles. (Uriarte Cantolla, 2009)

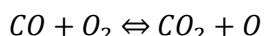
La principal fuente de emisión de  $NO_x$  se encuentra en el sector transporte, debido a las reacciones de combustión de los vehículos. También se generan en las instalaciones de combustión de las grandes industrias entre las que destaca la industria cementera. El sector residencial contribuye de forma menos intensa que el resto de sectores, siendo generados básicamente por las calderas de combustión.

### 3.1.1.2 Óxidos de carbono

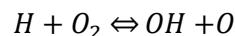
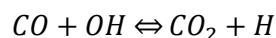
Bajo esta denominación se incluyen el monóxido y el dióxido de carbono. El dióxido de carbono es el principal responsable del efecto invernadero, sobre todo por sus elevadas emisiones en comparación con otros gases. Sin embargo, el monóxido de carbono, al ser tóxico, es mucho más peligroso.

En todo proceso de combustión completa, de forma simplificada, se pasa de combustible y comburente a dióxido de carbono y agua<sup>1</sup>. Si se estudia la combustión con mayor grado de detalle, se puede apreciar que se dan en realidad dos procesos: uno de oxidación parcial de combustible a CO y otro de oxidación del CO a  $CO_2$ . La reacción de formación de CO tiene una velocidad elevada. Sin embargo, la de oxidación del mismo es más lenta a menos que esté presente el radical OH.

Las reacciones que gobiernan la oxidación del CO a velocidades razonables son las siguientes:



<sup>1</sup> Excepto en la combustión del hidrógeno puro, que no se forma  $CO_2$ .



La reacción de formación de iones OH, al ser la más lenta, es controlante en este proceso de destrucción de CO.

En la aparición de monóxido de carbono en los motores pueden distinguirse dos casos:

El primero se da en regiones muy pobres, que suelen aparecer a baja carga con elevados excesos de aire. En este caso, se impide la propagación de la llama hacia estas zonas, y el combustible sólo se oxida parcialmente. El segundo caso ocurre cuando las condiciones son opuestas. En mezclas ricas pueden aparecer regiones en que la mezcla de aire y combustible evaporado no dé tiempo a realizarse a la misma velocidad que la reacción de combustión. En este caso, la concentración de CO en los gases de escape estará estrechamente relacionada con el dosado de la mezcla, como se ilustra en la figura 3-6. También se puede observar que esto no ocurre en el primer caso: las emisiones de CO en mezclas pobres son independientes del dosado.

Otros fenómenos de aparición de CO son el apagado de la llama por el contacto con superficies frías (paredes del cilindro) y la descomposición térmica del CO<sub>2</sub>, dadas las elevadas temperaturas que se alcanzan en el interior de los motores.

El monóxido de carbono es incoloro, inodoro e insípido. En concentraciones elevadas, su inhalación es altamente peligrosa, ya que se adhiere a los glóbulos rojos reduciendo su capacidad de oxidarse, como se muestra en la figura 3-3:

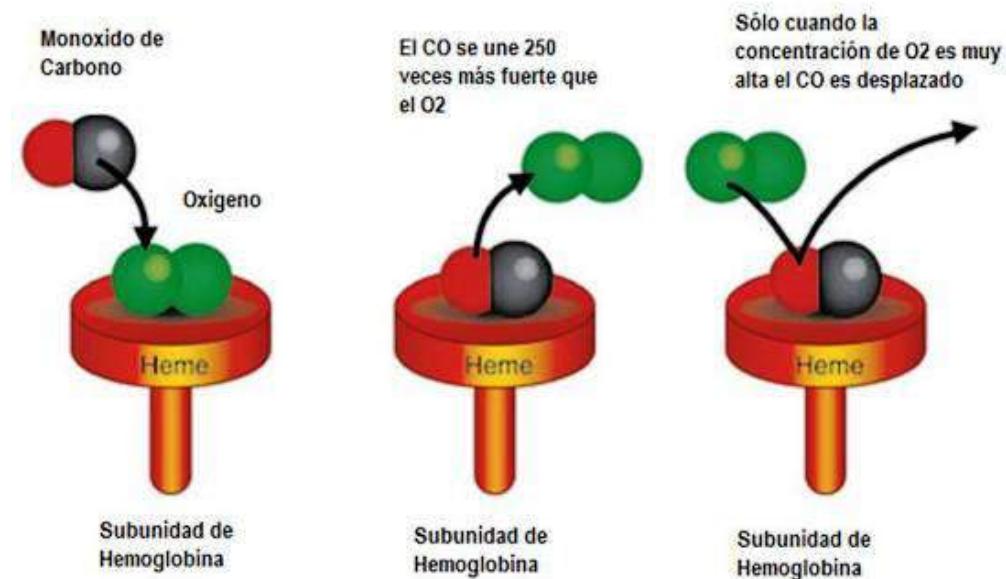


Figura 3-3: Efecto del monóxido de carbono en la hemoglobina.

Fuente: <http://www.jems.com/>

Sin embargo, en espacios abiertos no suelen alcanzarse concentraciones peligrosas.

El CO reacciona con el oxígeno atmosférico para formar dióxido de carbono, contribuyendo así al calentamiento global. Es también un precursor del ozono troposférico.

Su principal foco de emisión son los motores de combustión interna en el transporte y, a menor escala, el sector residencial y la industria.

### 3.1.1.3 Hidrocarburos

Son moléculas formadas principalmente por carbono e hidrógeno. Se producen en los motores de los vehículos, refinerías, manipulación y transporte de combustibles, evaporación de disolventes orgánicos...

En los motores de los vehículos, pueden deberse, entre otros, a los siguientes efectos: apagado de llama en paredes, insuficiente evaporación del combustible, fugas de escape, cortocircuito de la carga fresca y dosados extremos. No son muy importantes en mezclas pobres con exceso de oxígeno y temperaturas aún elevadas, pues los hidrocarburos suelen oxidarse bajo estas condiciones en el colector y tubo de escape.

En la figura 3-4 se muestra la dependencia de las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos en general con la inversa del dosado (parámetro lambda):

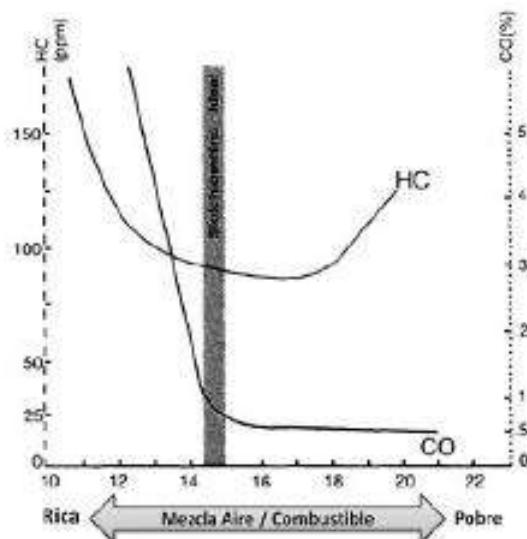


Figura 3-4: Concentración de gases de escape en función del parámetro lambda.

Fuente: [http://e-auto.com.mx/manual\\_detalle.php?manual\\_id=244](http://e-auto.com.mx/manual_detalle.php?manual_id=244)

Existe un criterio de clasificación de hidrocarburos en cuatro grupos:

- Compuestos orgánicos volátiles (COVs): Sus fuentes principales son los procesos de combustión en el transporte y procesos industriales como la siderurgia, la pintura y el lavado en seco. Son precursores del ozono troposférico y destructores del estratosférico. Además, contribuyen a la formación del smog fotoquímico.
- Metano: Aunque es también un compuesto orgánico volátil, se produce en su mayoría de forma natural mediante la descomposición anaerobia de materia orgánica. También se genera en procesos agrícolas, en eliminación de residuos y en los rumiantes. Además de tóxico, es precursor del ozono troposférico, entre otros contaminantes.
- Hidrocarburos aromáticos: Son compuestos orgánicos que tienen estructura cíclica (o anular). Su rasgo más característico es el olor “agradable”. Se engloban bajo esta denominación tanto al benceno y sus derivados, como al resto de compuestos orgánicos no alifáticos, aunque suele usarse para los primeros.
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos: Se engloban bajo esta denominación al conjunto de compuestos aromáticos cuya estructura molecular consta de varios anillos bencénicos. Los efectos de los hidrocarburos aromáticos son disminución del nivel de glóbulos rojos en sangre, daños en la médula ósea, hemorragias y daños al sistema inmunitario. Además, se ha demostrado que pueden ser cancerígenos.

### 3.1.1.4 Partículas en suspensión

Es partícula toda materia presente en los gases de escape que se encuentra en estado líquido o sólido en condiciones ambientales.

La principal vía de formación de partículas de hollín se da cuando colisionan dos compuestos aromáticos policíclicos, dando lugar a una partícula de estructura tridimensional. El proceso de formación de las mismas transcurre desde la llama hasta el sistema de escape, y se detalla a continuación:

La primera etapa se denomina nucleación. Se da en regiones próximas a la zona de reacción, ricas en combustible y con temperaturas elevadas, donde la concentración de radicales e iones son máximas. Consiste en la formación de una fase sólida a partir de una fase vapor de los iones anteriores. Estos núcleos, por su tamaño reducido, no son muy relevantes en la masa total de hollín. Sin embargo, son muy importantes para la producción final del mismo; pues actúan como núcleos que favorecen el posterior crecimiento de las partículas.

A continuación tiene lugar la etapa de crecimiento de dichas partículas. Este proceso se perpetúa hasta zonas de menor temperatura. Puede hablarse de crecimiento superficial o por coagulación. El primero de ellos consiste en la adición de hidrocarburos gaseosos a las partículas, no variándose éstas en número, pero sí en masa. La coagulación es la formación de una partícula esférica mediante la colisión de dos más pequeñas; por tanto, se reduce el número de partículas sin afectar a la masa total.

Le sigue el proceso de oxidación, mediante el cual se combina el carbono de las mismas con oxígeno produciéndose CO y CO<sub>2</sub>. El proceso de oxidación compite con el de formación. Comienza a temperaturas superiores a los 1300 K y se acelera hasta los 2000 K. A partir de esta temperatura, su velocidad permanece más o menos constante.

Finalmente, la aglomeración y agregación de las partículas tiene un resultado similar a la coagulación explicada anteriormente en cuanto a número y masa de partículas.

En cuanto a su composición, puede hablarse de una fracción insoluble (ISF) compuesta principalmente por hollín, sales, agua..., y una fracción orgánica soluble (SOF) en disolvente orgánico, formada por combustible y aceite sin quemar.

En cuanto al tamaño de las partículas, hay varios rangos que resultan relevantes: el primero, con tamaños más pequeños (en torno a 0.010 micras), se conoce como moda de nucleación y aglutina al mayor número de partículas. El segundo, denominado moda Aitken engloba las partículas de entre 0.02 y 0.1 micras. Por último, el tercer rango incluye partículas con tamaños superiores (entre 0.1 y 1 micra). Se denomina moda de acumulación, y en ella se concentra la mayor parte de la masa de las partículas. Se conoce como moda gruesa al conjunto de partículas de más de una micra, y la masa de las mismas es de un orden de magnitud mayor que las anteriores. En la figura 3-5 viene representada de manera orientativa la distribución típica de partículas en número, superficie y masa según su tamaño.

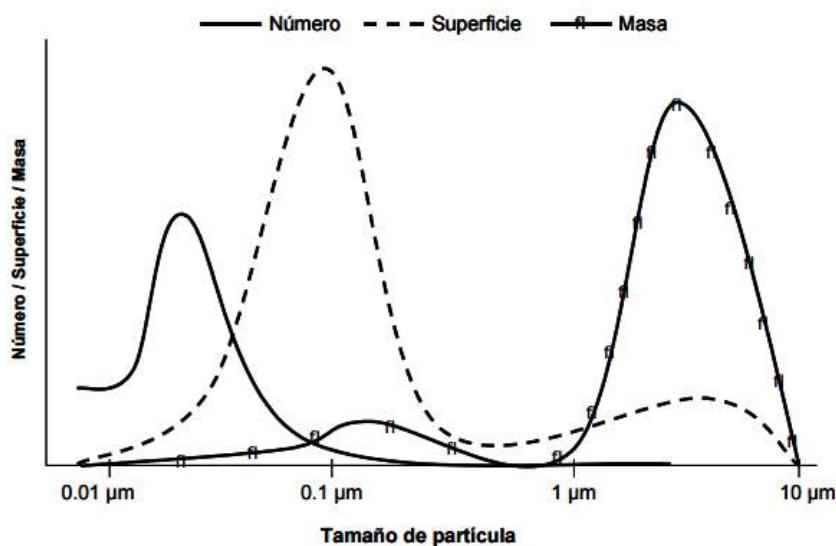


Figura 3-5: Número, superficie y masa del material particulado atmosférico en función de su distribución

granulométrica (según Dr. H C Hasson).

Actualmente sólo existe limitación para la masa total de las partículas, pero no para su tamaño. Sin embargo, más importantes que la masa son el tamaño, la morfología y la composición química de las mismas. Se ha demostrado que las partículas más pequeñas son más peligrosas, ya que su velocidad de sedimentación disminuye, el arrastre aumenta y, por tanto, también su tiempo de residencia en la atmósfera. Además, son más reactivas, al tener mayor superficie específica. Otro inconveniente es su dificultad de eliminación en filtros. Sin embargo, el mayor inconveniente que presentan en las personas es que pueden penetrar más profundamente en las vías respiratorias cuanto menor es su tamaño, causando numerosas enfermedades. Las propiedades aerodinámicas y termodinámicas de las partículas condicionan cómo y dónde se depositan las partículas en el aparato respiratorio. Por otra parte, las propiedades físico-químicas y biológicas determinan su interacción con las células. (Überall , Otte, Eilts, & Krahl, 2015)

Además, según su composición, las partículas pueden servir de medio para reacciones químicas, reducir la visibilidad, producir ensuciamientos...

La principal fuente de emisión de las mismas son los motores diesel, aunque otra componente importante (no antropogénica) son los vientos saharianos y las erupciones volcánicas. (Alonso Pérez, 2007)

### 3.1.1.5 Compuestos de azufre (SOx)

El dióxido de azufre es un gas incoloro, pero de olor fuerte e irritante. Se produce principalmente en erupciones volcánicas y durante la combustión de carburantes con un cierto contenido en azufre en el transporte, calderas, etc.

La reducción de las emisiones consiste en bajar la concentración de azufre en los combustibles, aunque esto implique mayores emisiones de CO<sub>2</sub> de las refinerías, o la necesidad de aditivar los combustibles.

En la figura 3-6 se muestra la reducción de los niveles de azufre que ha llevado la entrada en vigor de las diferentes normativas:



Figura 3-6: Requisitos de contenido de azufre en el combustible para las distintas regulaciones ambientales.

Fuente: <http://biblioteca.iapg.org.ar/ArchivosAdjuntos/Petrotecnia/2003-5/Calidad.pdf>

El monóxido de azufre puede formarse mediante varias reacciones, entre las que cabe destacar las siguientes:



El SO puede ser oxidado a SO<sub>2</sub> posteriormente. La formación de SO<sub>3</sub> es menos frecuente, dándose únicamente en mezclas pobres.

El combustible que presenta mayor contenido de azufre es el carbón, seguido del diésel y éste de la gasolina. Por consiguiente, la mayor parte de las emisiones de óxidos de azufre no provienen de los MCIA usados en el transporte, sino de las centrales de carbón y ciclo combinado destinadas a la generación de energía eléctrica y demás sectores industriales que usan este tipo de combustible.

Los SOx provocan irritación de ojos y mucosas en los seres humanos. Además, a altas capas de la atmósfera

reaccionan con la humedad produciendo ácido sulfúrico (lluvia ácida).

### 3.1.1.6 Metales pesados

Los más representativos son plomo, mercurio, arsénico, cadmio y níquel.

En motores, el de mayor repercusión ha sido el plomo. Sin embargo, con su eliminación en los combustibles, sus emisiones se han reducido considerablemente. Desde el año 2000, se ha restringido fuertemente la comercialización de la gasolina con plomo en los Estados miembros de la Unión Europea. La normativa establece que éstos pueden únicamente seguir permitiendo la comercialización de pequeñas cantidades de gasolina con un contenido en plomo que no supere los 0,15 g/l, hasta un máximo del 0,03 % del total de ventas, para su uso en vehículos antiguos de tipo especial y cuya distribución se lleve a cabo por medio de grupos de interés especial.

En la actualidad se emiten puntualmente en industrias siderometalúrgicas y manufacturas de baterías y acumuladores.

### 3.1.1.7 Ozono

Al ser un contaminante secundario, se estudiará en la subsección “efectos de los contaminantes”.

## 3.1.2 Efectos de los contaminantes

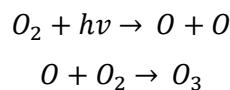
Anteriormente han sido estudiados los efectos directos que tiene cada contaminante en la naturaleza y, por ende, en los seres humanos. A continuación, se describirán otros efectos que surgen como consecuencia de la emisión combinada de algunos de los contaminantes anteriores. Estos efectos pueden ser la emisión de un nuevo contaminante, la aparición de un nuevo fenómeno atmosférico o la alteración de algún fenómeno existente.

### 3.1.2.1 Alteración del ozono

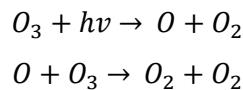
En este apartado tienen cabida dos fenómenos distintos: el más conocido es la destrucción del ozono estratosférico, cuya consecuencia más sonada es el agujero de la capa de ozono. El otro, la formación de ozono troposférico como contaminante secundario derivado de los estudiados en el apartado anterior.

En cuanto a la destrucción del ozono estratosférico, debería hablarse en realidad de un desequilibrio de las reacciones de formación y destrucción del mismo hacia estas últimas, ya que ambas tienen lugar de forma natural en la estratosfera. A continuación se muestran ambos procesos:

- Formación del ozono: durante la misma tienen lugar dos reacciones principalmente; una de disociación de una molécula diatómica de oxígeno al absorber la energía de un fotón procedente de la radiación ultravioleta seguida de otra de unión entre uno de los átomos libres de oxígeno con otra molécula diatómica, como se muestra a continuación:



- Destrucción del ozono: al incidir la radiación ultravioleta en las moléculas de ozono, pueden provocar la ruptura de éstas en un átomo libre y otra molécula diatómica. Dichos átomos reaccionarán posteriormente con otra molécula de ozono dando lugar a dos de oxígeno diatómico. Esta última reacción es bastante lenta, aunque se cataliza en presencia de óxidos de nitrógeno, hidrógeno y cloro; por lo que el aumento de la concentración de estos últimos puede considerarse una causa del desequilibrio entre las reacciones de formación y destrucción del ozono comentado anteriormente. A continuación se muestran ambas reacciones:



Las emisiones de los MCIA, en concreto, las de NOx, pueden considerarse una de las causas de este efecto,

aunque son en realidad los compuestos clorofluocarbonados usados sobre todo en refrigerantes los principales responsables del agujero en la capa de ozono.

Como ya se ha comentado, el ozono es considerado un contaminante si se encuentra en la troposfera, ya que tiene efectos nocivos sobre los seres vivos, generalmente relacionados con el sistema respiratorio como insuficiencia, inflamación pulmonar, asma y otras enfermedades broncopulmonares, al ser un potente oxidante. Como consecuencia, la formación de estas moléculas en cotas por debajo de unos 10 km se considera un problema de contaminación, generalmente conocido como ozono troposférico.

El ozono troposférico se considera un contaminante secundario, ya que en su formación intervienen, además de la luz solar, otros contaminantes primarios (NOx, COV, CO, CH4...).

Según el informe de 2001 del IPCC este incremento ha sido de un 35 % a lo largo del siglo XX en el hemisferio norte. Es debido: 1) al aumento de la quema de la vegetación con fines agrícolas en las sabanas tropicales, y 2) al aumento de las emisiones de óxidos de nitrógeno y de compuestos volátiles orgánicos, cuya fuente principal son los motores de los automóviles. (Uriarte Cantolla, 2009)

### 3.1.2.2 Smog fotoquímico

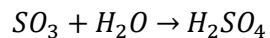
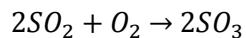
Es una mezcla tóxica entre humo y niebla (de ahí su nombre) que se suele formar en la parte inferior de la troposfera y que está compuesta principalmente por ozono, aunque también es consecuencia de las emisiones de NOx y COV en presencia de la luz solar.

Tiene efectos perjudiciales tanto en los seres humanos como en la vegetación, sobre todo en las cosechas, además de causar la corrosión de algunos materiales, como los usados en construcción, caucho, textil, etc.

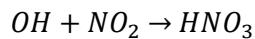
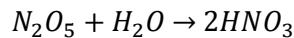
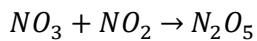
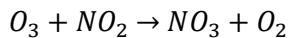
### 3.1.2.3 Lluvia ácida

El fenómeno resulta de la combinación de la humedad del ambiente con óxidos de nitrógeno y azufre. Como consecuencia, se forman en las nubes mezclas ácidas cuyo nivel de pH puede llegar a ser inferior a 4. Posteriormente, es alejada de los focos emisores arrastrada por el viento y, cuando llueve, es rociada sobre la superficie terrestre con las correspondientes consecuencias que esto conlleva en cuanto a corrosión. A continuación se muestran las principales vías de formación:

- A partir de óxidos de azufre:



- A partir de óxidos de nitrógeno:



Parte de la responsabilidad sobre la formación de lluvia ácida recae sobre los MCIA debido principalmente a sus emisiones de NOx. Otro importante factor precursor de lluvia ácida son las emisiones, tanto de NOx como de SOx que tienen lugar en las centrales de generación de energía eléctrica; sobre todo, las plantas de vapor.

Los contaminantes secundarios son un efecto de los primarios que, además, tiene carácter sinérgico; es decir, su efecto es superior a la suma de efectos individuales de cada contaminante primario que los origina. Por consiguiente, para frenar su formación y paliar sus efectos, es de vital importancia el control de los contaminantes primarios.

En la subsección anterior se muestran algunos de los efectos producidos por cada contaminante primario. En ésta, tienen cabida, además de los efectos de los contaminantes como precursores de otros fenómenos contaminantes, los efectos de los mismos en los seres vivos. De esta forma, se muestra en la figura 3-7 un esquema con los principales mecanismos biológicos causados por la inhalación de aire contaminado (en general):

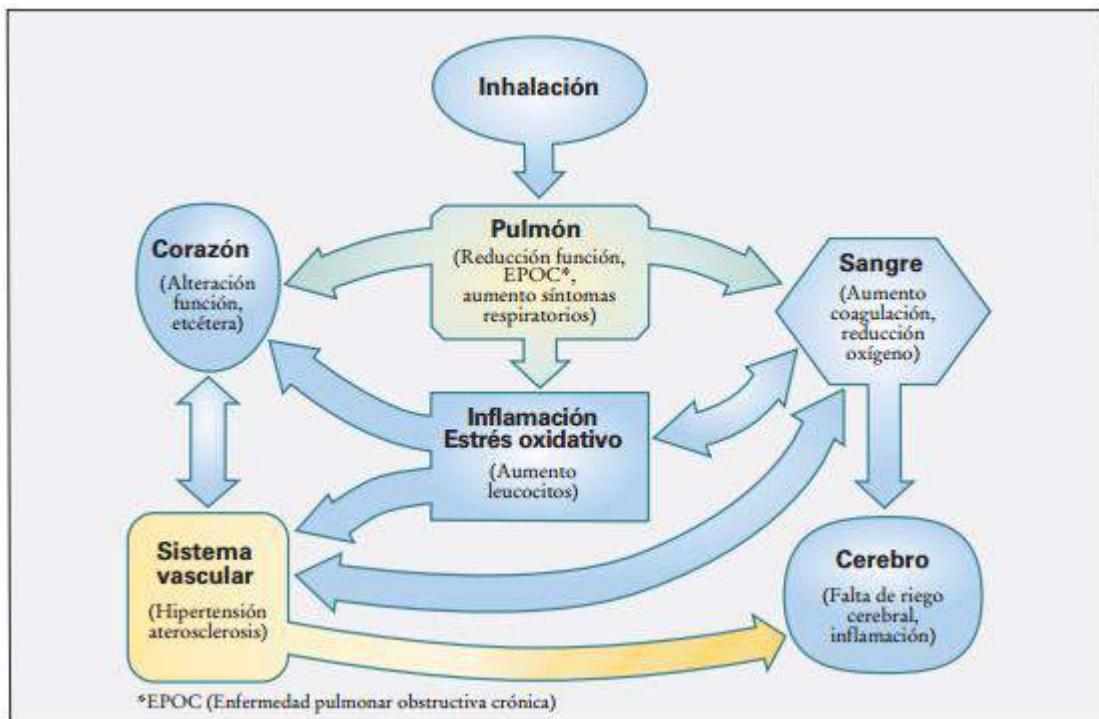


Figura 3-7: Efectos de la inhalación de aire contaminado sobre la salud.

Fuente: modificado de Pope y Dockery (2006).

[http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Publicaciones/Cuadernos/4%202011/Calidad\\_del\\_aire\\_urbano\\_salud\\_y\\_trafico\\_rodado.pdf](http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Publicaciones/Cuadernos/4%202011/Calidad_del_aire_urbano_salud_y_trafico_rodado.pdf)

Como conclusión de este apartado, se puede decir que los principales contaminantes primarios emitidos por los MCIA son los NOx, el CO, los HC y las partículas. Más adelante se detalla el tratamiento de cada uno de ellos según el tipo concreto de motor.

### 3.2 Metodología de estimación de emisiones

Existen diversos criterios para contabilizar las emisiones de gases contaminantes: medida directa, balances de materia, modelos informáticos... En los vehículos se suelen utilizar métodos basados en factores de emisión.

Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido y una unidad de actividad, que bien puede ser consumo de combustible, energía o distancia recorrida. En el caso de los vehículos ligeros, la normativa europea limita las emisiones contaminantes en g/km. Sin embargo, para vehículos pesados y otro tipo de maquinaria (motores estacionarios, maquinaria no de carretera, etc.) se limitan las emisiones en g/kWh, ya que lo que se homologa es el motor en sí, y no un vehículo concreto.

Es muy común hacer ensayos para cuantificar las emisiones. En los vehículos suelen hacerse ciclos de ensayos; ensayos dinámicos en los que se reflejan, en la medida de lo posible, condiciones normales de conducción. Así se evita que los fabricantes de motores optimicen las emisiones para un tipo de ensayo determinado pero éstas sean muy superiores en el funcionamiento diario de los mismos.

Para ensayar vehículos ligeros, se colocan éstos sobre bancos de rodillos equipados con frenos que simulen la resistencia al avance del vehículo e inercias que simulen el peso del mismo. Para medir las emisiones, se almacenan los gases de escape en una bolsa para su posterior análisis. También se pueden medir las concentraciones instantáneas e integrar el caudal instantáneo de emisión de cada contaminante durante un intervalo de tiempo determinado. Los ciclos empleados en europa para la homologación de emisiones en vehículos ligeros constan de dos partes: una que simula la conducción urbana y otra que refleja las condiciones de conducción extraurbana. Ambos se representan en la figura 3-8:

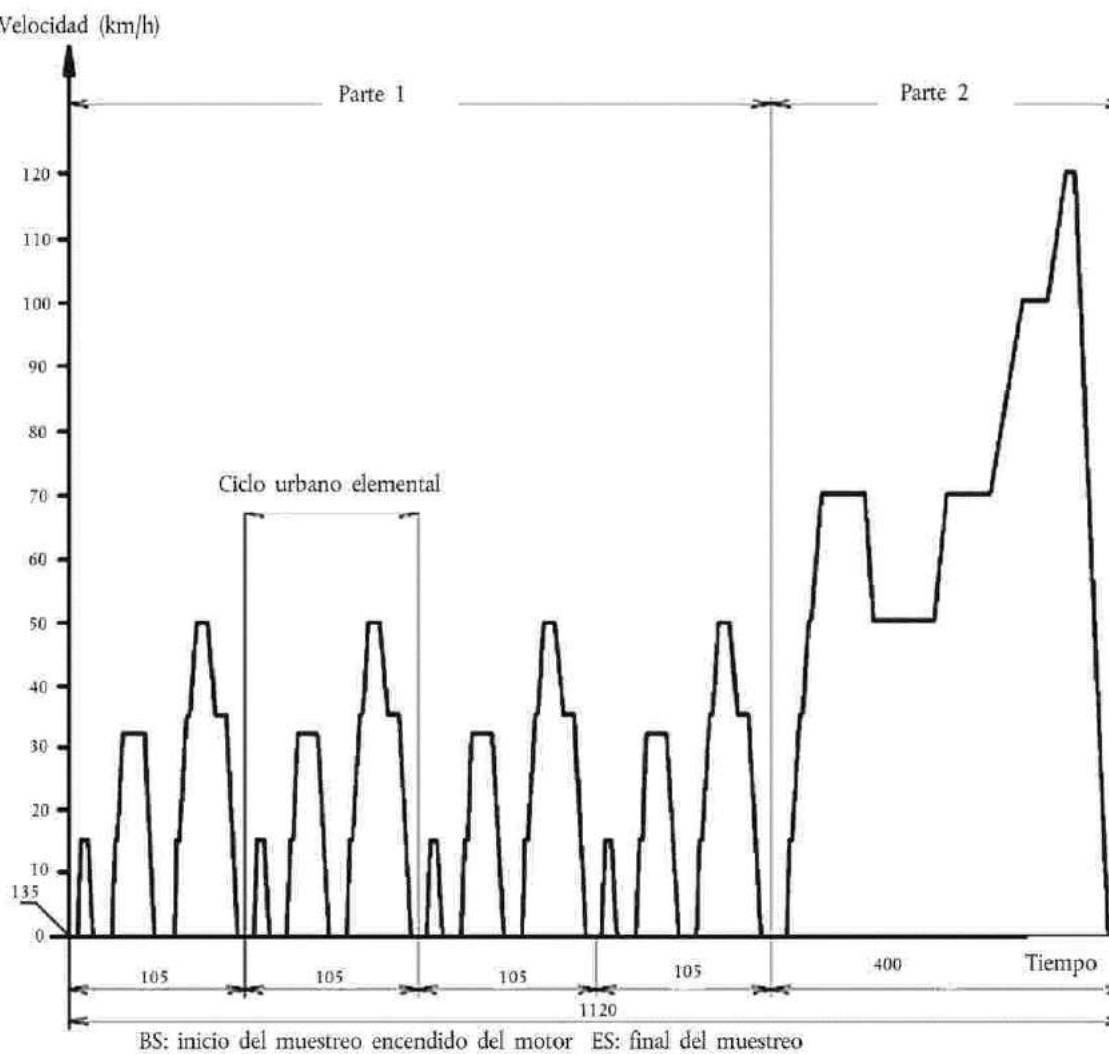


Figura 3-8: Ciclos urbano (Parte 1) y extraurbano (Parte 2) de homologación de emisiones para vehículos ligeros.

Fuente: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:42012X0215\(01\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:42012X0215(01))

En el resto de motores, tanto de vehículos pesados como estacionarios, los ensayos tienen lugar en un banco de ensayos para motores. En el caso de los vehículos pesados, se someten a tres ciclos diferentes: ciclo ESC (European Stationary Cycle), ciclo ETC (European Transient Cycle) y ciclo ELR (European Load Response).

### 3.3 Normativa reguladora

Existen multitud de disposiciones promulgadas para los vehículos a motor, que abarcan desde las características de los combustibles hasta los límites de emisión pasando por las especificaciones técnicas de los vehículos. Todos los automóviles del mercado deben cumplir una determinada normativa para su homologación que, posteriormente, se comprueba en las inspecciones técnicas de vehículos (ITV).

Dentro del alcance de este trabajo, tiene cabida la normativa referente a emisiones y, más concretamente, emisiones contaminantes. Los límites de emisiones de CO<sub>2</sub> (no contaminante), están también recogidos en la normativa, pero no se tratarán en este documento.

La preocupación por las emisiones contaminantes de los vehículos comenzó a finales de los 60, especialmente en Los Angeles, cuando se dispararon las ventas de vehículos para uso privado. Las condiciones atmosféricas combinadas con el aumento de las emisiones tuvieron como consecuencia la formación de smog fotoquímico,

que cubrió la ciudad durante unos días, hasta que el viento lo disipa. Como consecuencia de ello, la población empezó a concienciarse de la problemática contribución de las emisiones de los vehículos en la contaminación atmosférica, y los gobiernos han actuado desde entonces dictando normativas que las regulasen. Estas normativas se van volviendo poco a poco cada vez más restrictivas, ya que no pueden adelantarse a la tecnología de reducción de emisiones, sino que ambas deben ir al compás.

Existen multitud de normativas referentes a las emisiones contaminantes de los vehículos, que son aplicables en una extensión geográfica y durante un tiempo determinados. A continuación se exponen algunas de ellas.

### 3.3.1 Europea

El organismo que controla las emisiones en Europa y, por tanto, en España desde principios de los 90 es la Unión Europea. La normativa que dicta la UE, ha sido modificada y actualizada a lo largo de los años. La primera versión, conocida como Euro 1, fue lanzada en 1992. La segunda edición (Euro 2), en enero del 96. Posteriormente, en el primer mes del 2000 salió la tercera edición; y, la cuarta, cinco años más tarde. La Euro 5 fue lanzada en 2009 y sustituida posteriormente por la Euro 6 en 2014.

A partir de la entrada en vigor de la normativa Euro 6, los vehículos diesel se ven obligados a reducir notablemente sus emisiones de óxidos de nitrógeno. En lo relativo a coches y otros vehículos de transporte, desde el 1 de septiembre de 2014 se limitan a 80 mg/km, casi la mitad que en la normativa anterior. Las emisiones combinadas de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno se limitan a 170 mg/km en estos vehículos.

La Comisión establece procedimientos, ensayos y requisitos específicos relativos a:

- las emisiones del tubo de escape, incluidos los ciclos de ensayo, las emisiones en baja temperatura ambiente, las emisiones al ralentí, la opacidad de los humos y el funcionamiento y la regeneración correctos de los sistemas de postratamiento;
- las emisiones de evaporación y emisiones del cárter del cigüeñal;
- los sistemas de diagnóstico a bordo (DAB) y el comportamiento de los dispositivos de control de la contaminación en los vehículos en circulación;
- la durabilidad de los dispositivos de control de la contaminación, los dispositivos de control de las emisiones de recambio, la conformidad en circulación, la conformidad de la producción y la inspección técnica de vehículos;
- las emisiones de dióxido de carbono y el consumo de combustible;
- los vehículos híbridos;
- la extensión de las homologaciones de tipo y los requisitos aplicables a los pequeños fabricantes;
- los requisitos de los equipos de ensayo;
- los combustibles de referencia, como la gasolina, el diésel, los combustibles gaseosos y los biocombustibles;
- la medición de la potencia del motor.

En la tabla 3-1 se hace un resumen de los niveles de emisiones contaminantes permitidos en g/km para turismos (vehículos de categoría M1) desde la Euro 1 hasta la Euro 6.

Tabla 3-1: Límites de emisiones (en g/km) según tipo de contaminante y normativa para vehículos de categoría M1.

Tipo	Fecha	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
<b>Diésel</b>						
Euro I	Julio de 1992	2.72	-	0.97	-	0.14
Euro II, IDI	Enero de 1996	1	-	0.7	-	0.08
Euro II, DI	Enero de	1	-	0.9	-	0.1
Euro III	Enero de 2000	0.64	-	0.56	0.5	0.05
Euro IV	Enero de 2005	0.5	-	0.3	0.25	0.025
Euro V	Septiembre de 2009	0.5	-	0.23	0.18	0.005
Euro VI	Septiembre de 2014	0.5	-	0.17	0.08	0.005
<b>Gasolina</b>						
Euro I	Julio de 1992	2.72	-	0.97	-	-
Euro II	Enero de 1996	2.2	-	0.5	-	-
Euro III	Enero de 2000	2.3	0.2	-	0.15	-
Euro IV	Enero de 2005	1	0.1	-	0.08	-
Euro V	Septiembre de 2009	1	0.1	-	0.06	0.005
Euro VI	Septiembre de 2014	1	0.1	-	0.06	0.005

En el caso de los camiones y demás vehículos pesados Diesel, los ensayos usados para medir las emisiones son diferentes a los usados en vehículos ligeros. En un principio, y hasta la Euro II, se usó un ciclo de pruebas de estado estacionario en 13 modos: ECE-R49. A partir de la Euro II, se usó un ciclo de prueba estacionario (ESC) seguido de otro transitorio (ETC). Para evaluar las emisiones de humo y de hidrocarburos no metánicos (NMHC) se usa un ciclo de prueba de respuesta bajo carga (ELR). Los límites están expresados en g/kWh excepto en el caso de los humos, cuyas emisiones se regulan en m<sup>-1</sup>.

A continuación, en las tablas 3-2 y 3-3, se muestran los niveles de emisiones contaminantes permitidos para vehículos pesados en los ciclos ESC y ELR (tabla 3-2) y ETC (tabla 3-3).

Tabla 3-2: Límites de emisiones con los ciclos de prueba ESC y ELR

Norma	Aprobación de tipo	CO	HC	NOx	PM	Humo
		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	m-1
Euro I	1 oct de 1993	4.5	1.1	8	0.612 <sup>2</sup> / 0.36 <sup>3</sup>	-
Euro II	1 oct de 1996	4	1.1	7	0.15	-
Euro III	1 oct de 1999	2.1	0.66	5	0.1	0.8
	1 oct de 2000	2.1	0.66	5	0.10 / 0.13 <sup>4</sup>	0.8
Euro IV	1 oct de 2005	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Euro V	1 oct de 2008	1.5	0.46	2	0.02	0.5
Euro VI	1 ene de 2013	1.5	0.13	0.4	0.01	

Tabla 3-3: Límites de emisiones con los ciclos de prueba ETC.

Norma	Aprobación de tipo	CO	NMHC	NOx	PM
Euro I	1 oct de 1993	-	-	-	-
Euro II	1 oct de 1996	-	-	-	-
Euro III	1 oct de 1999 <sup>5</sup>	3	0.4	2	0.02
	1 oct de 2000	5.45	0.78	5	0.16/0.21 <sup>6</sup>
Euro IV	1 oct de 2005	4	0.55	3.5	0.03
Euro V	1 oct de 2008	4	0.55	2	0.03
Euro VI	1 ene de 2013	4	0.16	0.4	0.01

Fuente:

<http://espanol.lubrizol.com/EngineOilAdditives/ACEA/ReferenceMaterial/EuropeanUnionEmissionsStandards.html>

### 3.3.2 No europea

Fuera de Europa, generalmente, cada país emite su propia normativa en materia de emisiones contaminantes.

En el caso de Estados Unidos, la Agencia de Protección del Medioambiente (EPA) es la encargada de fijar los límites a las emisiones de los vehículos. Al igual que en Europa, esta normativa ha tenido varias versiones o etapas denominadas “Tier” seguido del número de versión correspondiente. En la tercera versión (Tier 3), que

<sup>2</sup> Para motores <85kW.

<sup>3</sup> Para motores >85kW.

<sup>4</sup> Para motores de cilindrada 0.75dm<sup>3</sup> y régimen de potencia nominal 3000 min-1 únicamente.

<sup>5</sup> Para vehículos ecológicos mejorados (EEV) solamente.

<sup>6</sup> Para motores de cilindrada 0.75dm<sup>3</sup> y régimen de potencia nominal 3000 min-1 únicamente.

fue anunciada por la Administración del presidente de EEUU en 2013, se incluyen medidas como la reducción de los niveles de azufre en la gasolina en más del 60% (hasta 10 ppm) y los de NOx en un 80% para 2017.

Un caso particular dentro de los EEUU en cuanto a este tipo de normativa es el de California, único estado al cual le es permitido contar con una agencia propia y emitir sus 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. Dicha agencia se conoce como Junta de Recursos del Aire de California (CARB) y está adscrita a la Agencia de Protección Ambiental de California, creada en 1967 durante el mandato de Ronald Reagan. Uno de sus programas más innovadores es el Mandato del Vehículo de Cero Emisiones (ZEV), iniciado en 1990, mediante el que se han creado varias categorías de vehículos de emisiones parciales o bajas: vehículos de ultrabajas o super-ultrabajas emisiones (ULEV y SULEV, respectivamente). Estas categorías engloban modelos de vehículos cuyas emisiones son un tanto por ciento menores que las emisiones promedio de los vehículos fabricados durante un año concreto, en este caso 2003. Los conductores de vehículos de estas categorías se benefician de medidas como la posibilidad de circular por carriles de alta ocupación aunque viajen con un único ocupante.

En el caso de Japón, se vieron obligados a reducir drásticamente las emisiones de sus vehículos en la mayoría de sus grandes ciudades. En Tokio, se tomó una iniciativa de endurecer los controles adelantada a la del gobierno, que consistió en poner controles, multas e incluso teléfonos de denuncia anónima para hacer cumplir la normativa. De esta forma, se pasó de tener unos niveles disparatados de contaminación en 2002 a cumplir con la normativa nacional de calidad del aire en 2005.

Otro aspecto característico de este país oriental es la aversión por los vehículos equipados con MEC. La población parece estar convencida de que, si bien en los MEC se producen mayores emisiones contaminantes, también es más sencilla la reducción de las mismas con los sistemas postratamiento; mientras que en los motores Diesel, la problemática es mayor en cuanto a la reducción de emisiones de NOx y partículas finas, por no hablar del problema del azufre contenido en el combustible. Para paliar la situación, el gobierno aprobó en dos ocasiones una legislación para la reducción de los niveles de azufre en el combustible Diesel. En ambas ocasiones (2003 y 2005), la normativa se cumplió antes de su entrada en vigor. En la figura 3-9 se muestran ambas reducciones mencionadas:

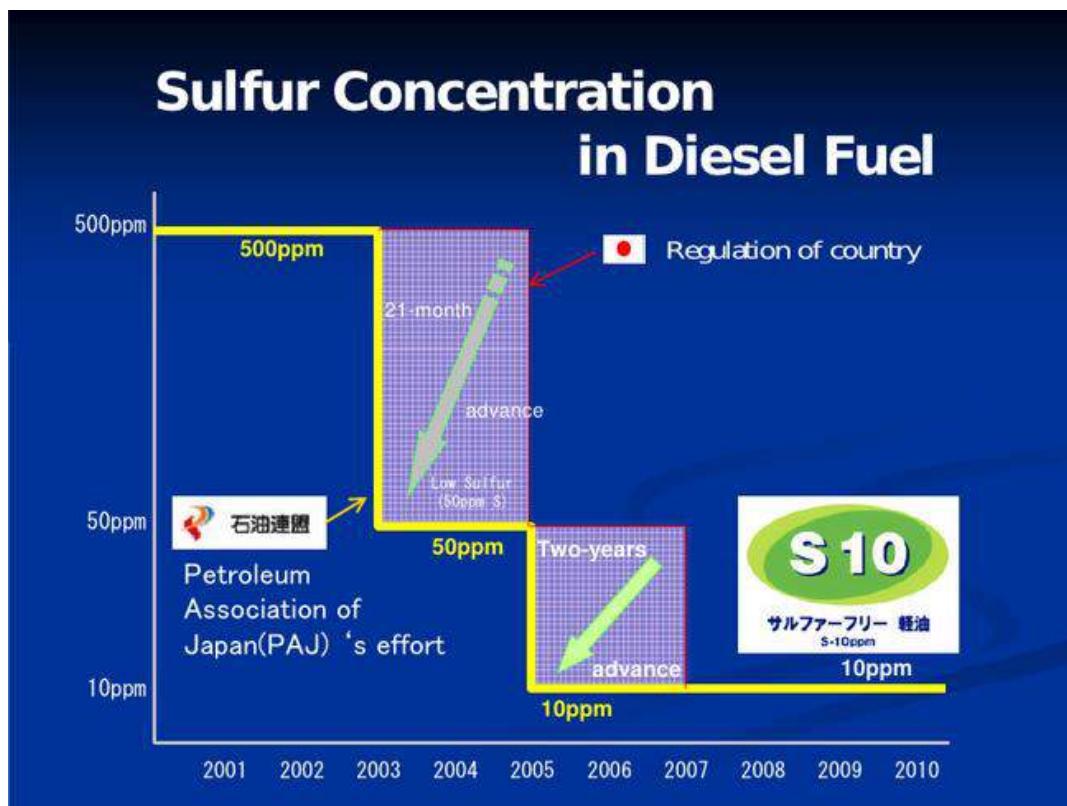


Figura 3-9: Tendencia del contenido de azufre (en ppm) en el combustible Diesel en Japón.

Fuente:<http://www.motorpasionfuturo.com/medio-ambiente/japon-y-su-historica-alergia-hacia-el-motor-diesel>

En el resto de países ajenos a la UE distintos de EEUU y Japón, se suele adoptar alguna normativa de las anteriores; aunque también es común la creación de una normativa propia, basada también en las ya mencionadas.

En Argentina, por poner un ejemplo, la normativa está basada en la equivalente estadounidense. Los ciclos de ensayo, por ejemplo, son similares a los FTP (Federal Test Procedures), aunque con 600 segundos de parada entre la fase estabilizada y la caliente, como se puede observar en la figura 3-10.

A continuación se muestran en la figura 3-10, a modo de ejemplo, los ciclos de ensayo usados en Argentina para homologar vehículos de gasolina y los límites fijados por la normativa para cada contaminante hasta el año 1999 en la tabla 3-4:

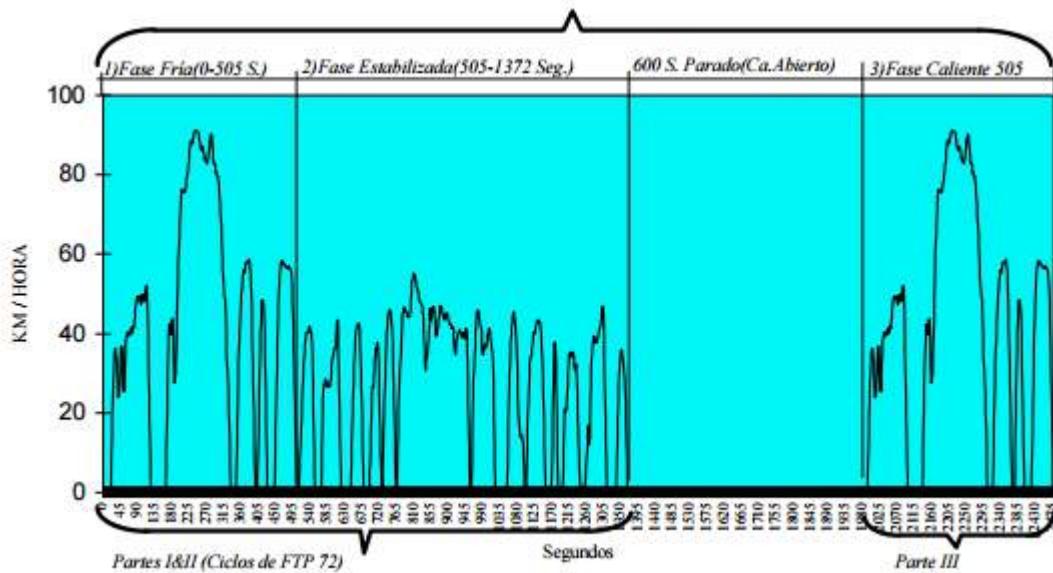


Figura 3-10: Ciclo de ensayo usado en Argentina para la homologación de emisiones de vehículos con MECH.

Fuente: [http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/mlegal/aire/res61\\_99\\_anx1.pdf](http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/mlegal/aire/res61_99_anx1.pdf)

Tabla 3-4: Límite de valores permitidos en Argentina para varias emisiones contaminantes de MECH.

Contaminante	Valor límite (g/km)				
	1994 <sup>7</sup>	1995	1997 <sup>8</sup>	1998	1999
Monóxido de carbono	24.0	12.0	2.0	6.2	2.0
Hidrocarburos <sup>9</sup>	2.1	1.2	0.3	0.5	0.3
Óxidos de nitrógeno	2.0	1.4	0.6	1.43	0.6

Fuente: [http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/mlegal/aire/res61\\_99\\_anx1.pdf](http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/mlegal/aire/res61_99_anx1.pdf)

En la figura 3-11 se muestra un mapa donde se representan las zonas en las que tiene vigencia cada una de las normativas anteriores:

<sup>7</sup> La ley fijó valores orientativos para su aplicación

<sup>8</sup> Sólo es exigido para nuevos modelos producidos a partir de 1997

<sup>9</sup> Contempla hidrocarburos totales

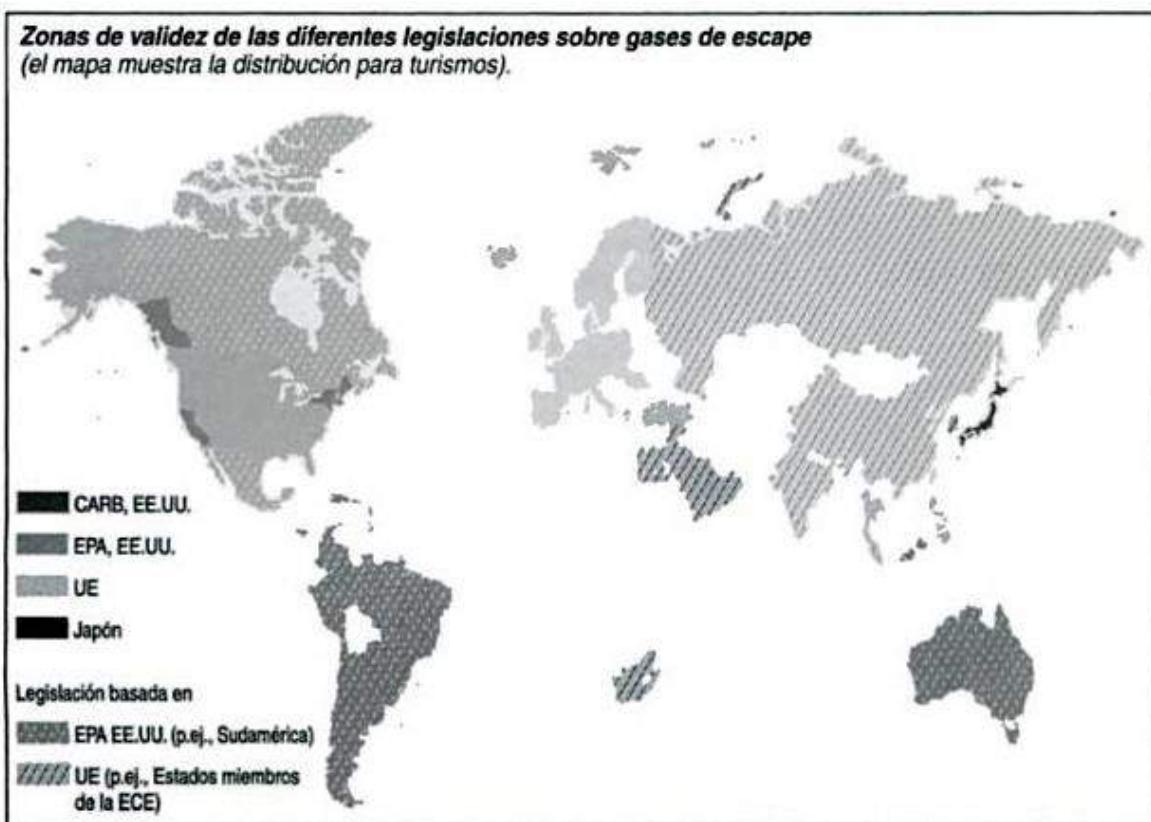


Figura 3-11: Áreas geográficas de validez de las diferentes legislaciones sobre gases de escape para turismos.  
(Bosch, 2005)

### 3.3.3 Emisiones reales

Una vez implantada una normativa de control de emisiones determinada, es necesario hacer que se cumpla durante la conducción real de los vehículos en el día a día. Sin embargo, la medición de emisiones a pie de calle no es tan sencilla y exacta como en el banco de pruebas. Aun así, se han llevado a cabo algunos estudios para verificar si las emisiones de los vehículos a pie de calle se corresponden con aquellas que fueron medidas para su homologación. Los resultados arrojados son los siguientes:

En uno de los estudios, llevado a cabo cerca de Zurich entre 2000 y 2012, se demostró que, si bien los vehículos de gasolina cumplían mayoritariamente con los límites de la normativa europea, los Diesel, tanto de pasajeros como comerciales ligeros (LCV), tenían emisiones de NOx muy superiores a las establecidas por dicha normativa, como se muestra en la figura 3-12. En estos vehículos, además, se comprobó que el resto de emisiones (CO, HC...) sí estaban dentro de los límites. Los ensayos se llevaron a cabo mediante una técnica de detección a distancia no intrusiva.

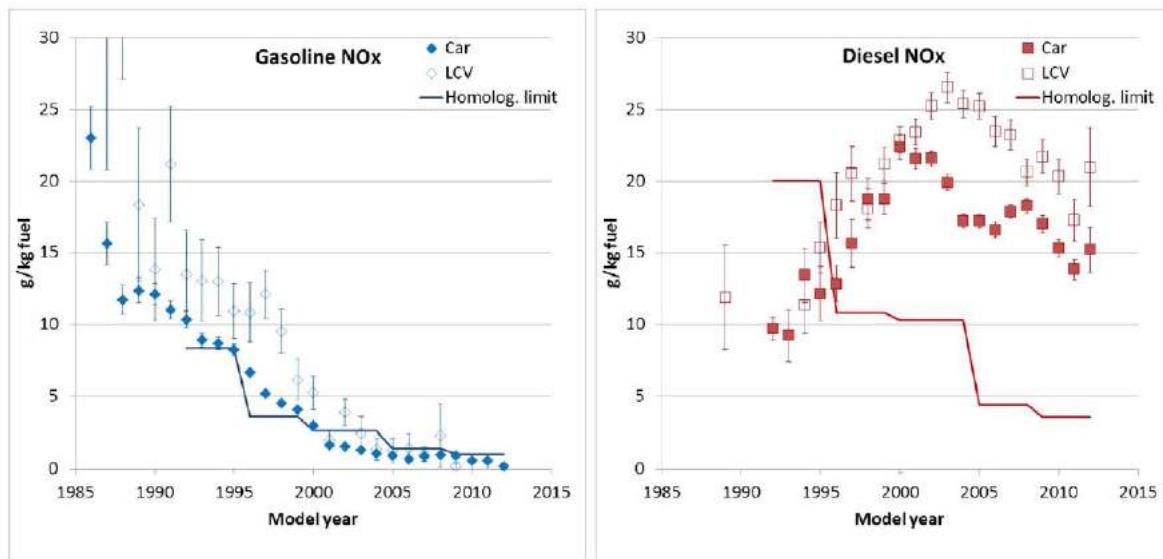


Figura 3-12: Comparación entre la media de emisiones de NOx en vehículos de gasolina y Diesel, de pasajeros y comerciales ligeros con los límites establecidos en la normativa europea para su homologación.

Fuente: (Chen & Borken-Kleefeld, 2014)

La gran discrepancia entre los valores teóricos (normativa) y reales se debe en gran medida a que la conducción real es más variable que la que se lleva a cabo durante el ciclo de homologación europeo (NEDC), a mayores velocidades y con mayores aceleraciones y deceleraciones.

Se concluyó que la media de emisiones de NOx en estos vehículos Diesel era de 10 a 20 veces mayor que las mismas en modelos de gasolina del mismo año.

En otros estudios llevados a cabo en el Reino Unido, se han sacado conclusiones similares: el control de emisiones de NOx en vehículos Diesel no es tan efectiva como estaba previsto en la legislación. Sin embargo, en dichas mediciones, llevadas a cabo en Londres, se midieron las emisiones de NH<sub>3</sub> y se comprobó que los vehículos de gasolina, tanto híbridos como convencionales, tienen mayores emisiones de este contaminante que los Diesel. En la figura 3-13 se puede comprobar que este tipo de emisiones tuvo un aumento excepcional con la inclusión de los sistemas de reducción catalítica de emisiones en los vehículos en Londres llevada a cabo en 1992. Las tasas más altas se dieron con los primeros vehículos catalizados. La entrada de la Euro 3 en el 2000 marcó un cambio de tendencia en dichas emisiones, que en 2012 ya representaban un tercio de su valor a finales de los 90.

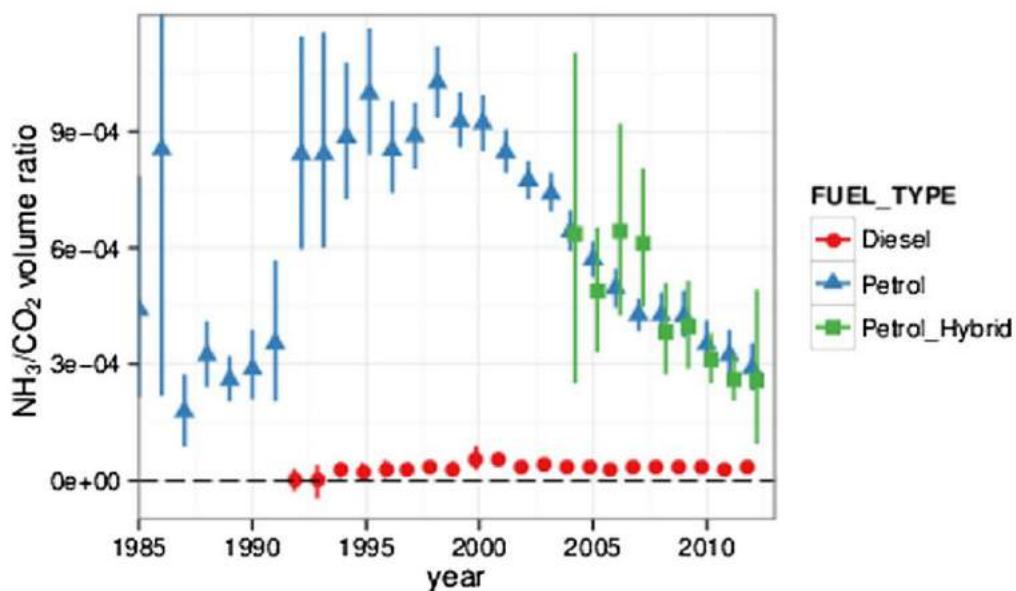


Figura 3-13: Emisiones de NH<sub>3</sub> de vehículos Diesel y gasolina, tanto híbridos como convencionales.

Fuente: (Carslaw & Carslaw, 2013)

### 3.4 Antecedentes

Hasta la década de los 80, el parque automovilístico estaba compuesto en su mayoría por vehículos de gasolina. Estos vehículos incorporaban sistemas de alimentación por carburador, por lo que el consumo de combustible era bastante más elevado que en la actualidad. Como dato orientativo, un vehículo de gasolina de 800 kg y 50 CV tenía un consumo de unos 10 l/100km.

Hacia finales de los 80, los avances tecnológicos en el campo de la electrónica hicieron posible un método de alimentación mucho más eficiente: la inyección electrónica de combustible. Esta tecnología permitió, además, abrir el mercado hacia los motores Diesel, que hasta la fecha se usaban sólo en maquinaria pesada, pero el menor consumo y precio del combustible los hacían muy atractivos para ser implantados en vehículos ligeros.

A principios de los 90, con la entrada en vigor en europa de la normativa Euro 1, se limitaron las emisiones de CO y las combinadas de NOx e HC, tanto en vehículos Diesel como gasolina. La consecuencia fue un uso generalizado de los catalizadores de oxidación y reducción. Además de esta medida, por esa misma fecha se dejó de usar plomo en las gasolinas, sustituyéndose en un principio por un compuesto llamado metil-terc-butil-éter (MTBE). Sin embargo, al cabo de los años se demostró que era tanto o más perjudicial que el plomo, y se pasó a utilizar etil-terc-butil-éter (ETBE), que no tiene efecto adverso alguno sobre los seres humanos. Este compuesto se sigue usando a día de hoy como antidetonante sustituyente del tetraetilo de plomo.

En cuanto al combustible Diesel, se tiende a aumentar el índice de cetano y reducir el contenido en azufre de los mismos.

Desde 1996, con la llegada de la Euro 2, y hasta la Euro 4 en 2005, se tomaron varias medidas para cumplir con la restricción de la normativa. Algunos fabricantes perfeccionaron los catalizadores anteriormente mencionados. En otros casos, se optó por modificar la mecánica de los motores haciéndolos en algunos casos más pequeños para disminuir el consumo y añadiendo en otros la sobrealimentación como método para reducir la cilindrada sin comprometer la potencia y reduciendo las emisiones. Otra medida fue la adición de marchas a la caja de cambios para operar los motores a menor régimen de vueltas, mejorando el proceso de mezcla y consiguiéndose igualmente un decremento de las emisiones.

En 2009 entró en vigor la Euro 5, cuya característica más llamativa fue la notable reducción de los niveles admisibles de emisiones de partículas en motores Diesel (de 25 a 5 mg/km). Como consecuencia, se incorporaron de forma generalizada los filtros antipartículas (DPF).

En los últimos años e incluso en la actualidad, con la llegada de la Euro 6, la problemática se centra en reducir

las emisiones de NOx en motores Diesel. Con esta finalidad, algunos fabricantes se plantean implementar filtros químicos para atrapar las moléculas de óxidos de nitrógeno. En otros casos, se estudia la posibilidad de añadir reactores químicos diseñados en principio para vehículos pesados. Por último, existen fabricantes que siguen optimizando la mecánica de sus motores evitando así incorporar nuevos sistemas postratamiento para cumplir con la normativa en lo referente a emisiones. Los sistemas mencionados para el control de las emisiones de los vehículos se explicarán en los capítulos siguientes.



# 4 SISTEMAS DE POSTRATAMIENTO DE GASES DE ESCAPE

---

**L**a legislación vigente limita las emisiones contaminantes de los motores de forma que, además de actuar sobre la configuración interna y la operación de los mismos para minimizar su formación, es necesario hacerlo sobre las propias emisiones añadiendo sistemas postratamiento, también denominados soluciones pasivas de reducción de emisiones.

En este capítulo se hará una descripción de los sistemas más utilizados y se expondrá el principio de funcionamiento, elementos, materiales, etc. de cada uno de ellos. Posteriormente, en los capítulos siguientes, se hará una breve introducción del funcionamiento de los motores según el ciclo descrito y se describirán los distintos sistemas que pueden usarse en cada uno de ellos.

Puede hacerse una primera clasificación de dichos sistemas en reactores y filtros.

## 4.1 Reactores

Su funcionamiento se basa en hacer reaccionar los contaminantes con otras sustancias, ya sean procedentes de la combustión o añadidos, para minimizar su emisión a la atmósfera. A su vez, pueden dividirse en tres grupos:

### 4.1.1 Reactores térmicos

Su finalidad es oxidar los productos contaminantes procedentes de la reacción incompleta, es decir, los HC, el CO y el H<sub>2</sub>. Para ello, requieren oxígeno y temperatura elevada que active las reacciones. El oxígeno se puede aportar de forma externa, o bien tomarse de los gases de escape. Para conseguir las elevadas temperaturas, se colocan próximos a la salida del motor para evitar el enfriamiento de los gases. Éstas se mantienen durante su operación, ya que se dan en su interior reacciones exotérmicas.

No son muy usados en la actualidad por su elevado coste, por no reducir las emisiones de NOx y por la necesidad de añadir aire si se trabaja con mezclas ricas.

### 4.1.2 Reactores catalíticos

Se emplean desde los comienzos de la normativa de reducción de emisiones, y su funcionamiento se basa en permitir que se den ciertas reacciones químicas que, por la temperatura a las que operan, no se darían sin la presencia de sustancias catalizadoras.

Su estructura interior se muestra en la figura 4-1 y consta de tres partes:

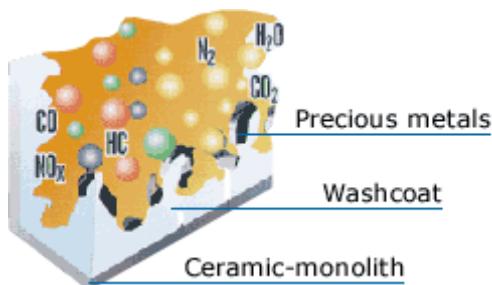


Figura 4-1: Estructura interior de un reactor catalítico.

Fuente: [http://www.eurokat.de/english/katinfos/katinfos\\_edelmetallimkat.html](http://www.eurokat.de/english/katinfos/katinfos_edelmetallimkat.html)

- Soporte: su finalidad es estructural. Sobre él irá ubicado el recubrimiento y sobre éste, el catalizador propiamente dicho. Consta de un elevado número de celdillas por unidad de superficie transversal al paso de los gases, para aumentar la relación superficie/volumen. La longitud de los canales debe ser tal que se asegure el tiempo de residencia necesario, y su relación con la sección de paso debe asegurar el flujo laminar en su interior. En la actualidad, los más usados son los de monolito cerámico o metálico. Los primeros se fabrican por extrusión de la pasta que, posteriormente, se calcina en un horno. Suelen tener celdillas cuadradas, y el material más usado es la cordierita. Los de monolito metálico constan de una estructura de acero inoxidable corrugado de forma similar al cartón arrollado en espiral consiguiéndose una mayor cantidad de celdillas que en el caso anterior. Este tipo de soporte es también más fino, por lo que su inercia térmica disminuye, y aumenta su resistencia a las altas temperaturas. Ambos soportes se muestran en la figura 4-2:

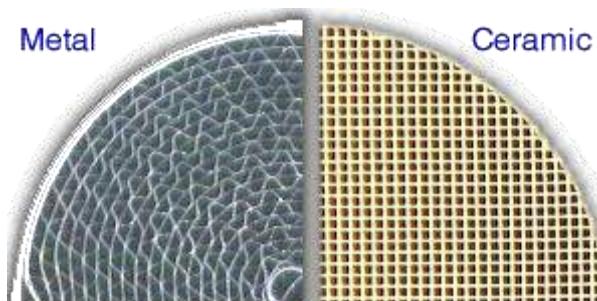


Figura 4-2: Estructura interior de los catalizadores de monolito metálico (izquierda) y cerámico (derecha).

Fuente: [https://www.dieselnet.com/tech/cat\\_substrate.php](https://www.dieselnet.com/tech/cat_substrate.php)

- Recubrimiento: su finalidad es doble. Por un lado, aumentar la superficie libre de contacto entre los gases y el catalizador gracias a su aspecto poroso y por otro poder adherir el catalizador al soporte. Generalmente se fabrica de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Pueden añadirse al mismo, además de los catalizadores, otras sustancias para reforzar su efecto, acumular oxígeno o evitar la sinterización de las sustancias catalizadoras. En la figura 4-3 se muestra un esquema del recubrimiento de un catalizador.

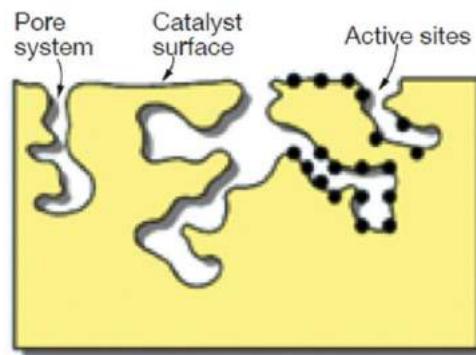


Figura 4-3: Representación esquemática del recubrimiento de un catalizador.

Fuente: [http://www.ccj-online.com/2q\\_2012-outage-handbook/scr-performance-management/](http://www.ccj-online.com/2q_2012-outage-handbook/scr-performance-management/)

- Catalizador: los metales preciosos son los encargados de catalizar las reacciones químicas. Los más usados en la actualidad son el platino (Pt), el paladio (Pd) y el rodio (Rd). Los dos primeros favorecen las reacciones de oxidación. Concretamente, el platino oxida mejor las parafinas de cadenas mayores al propano y el paladio el CO y las olefinas. Ambos tienen un comportamiento similar en la oxidación de aromáticos. El rodio, por su parte, tiene mayor efectividad en la reducción de los NOx.

En la figura 4-4 se representa de forma esquemática el interior de un monolito con vistas ampliadas de los elementos que contiene en el interior de sus canales: el recubrimiento y el metal activado:

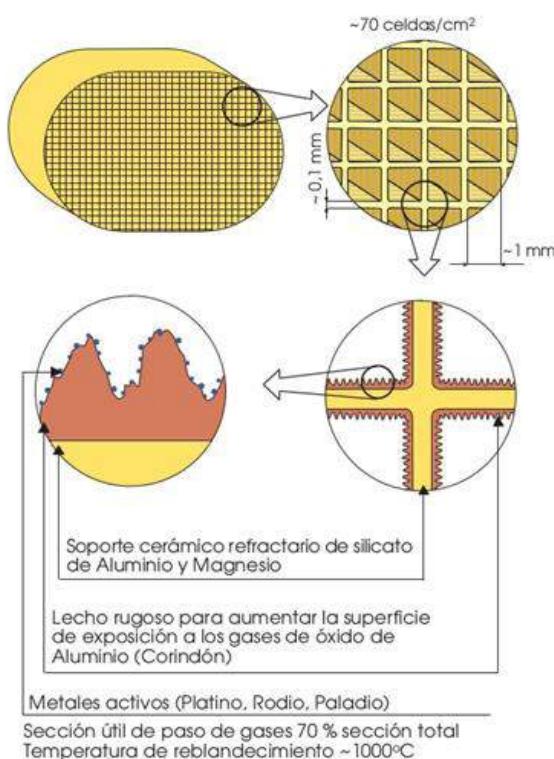


Figura 4-4: Vista esquemática ampliada del interior de un monolito de tipo cerámico.

Fuente: <http://es.slideshare.net/gonguibri/info-catalizador-7245066>

Constructivamente, todo lo anterior se coloca dentro de una carcasa metálica inoxidable, y se aísla térmicamente. También se le suelen añadir materiales elásticos que amortiguen los golpes que puedan occasionar baches y otros imprevistos durante la circulación. Todo esto se muestra en la figura 4-5:

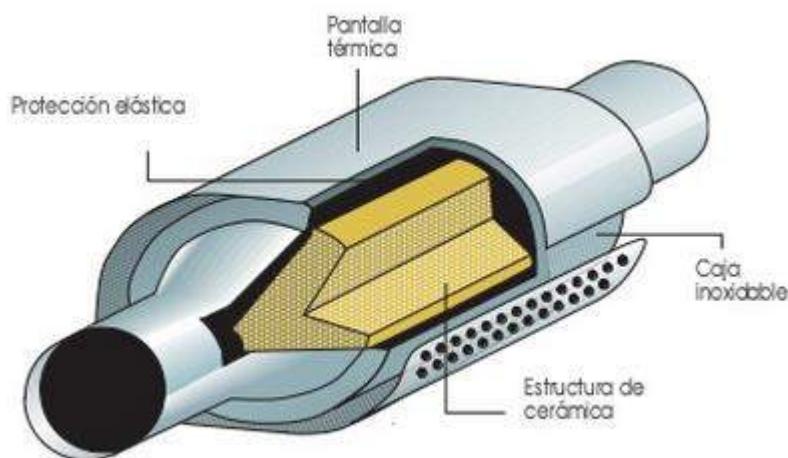


Figura 4-5: Estructura interna de un catalizador.

Fuente: <http://es.slideshare.net/gonguibri/info-catalizador-7245066>

Las piezas de las que suele constar un reactor catalítico son, por tanto, las carcchas metálicas exteriores con pantallas térmicas en su caso, unas bandas de protección flexibles que se colocan alrededor del monolito cerámico para su protección, y el propio monolito cerámico. Las partes mencionadas se distinguen más fácilmente si se hace un despiece del catalizador, como en la figura 4-6:

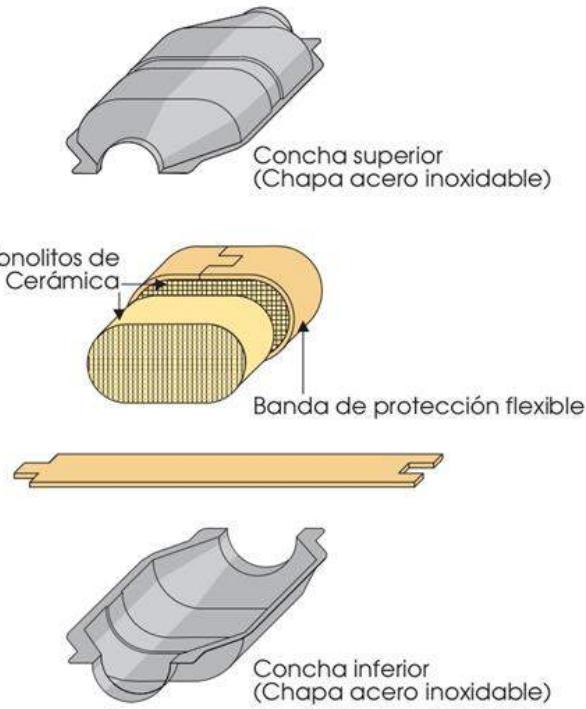


Figura 4-6: Despiece de un catalizador.

Fuente: <http://es.slideshare.net/gonguibri/info-catalizador-7245066>

A los catalizadores se les conoce como de oxidación, de reducción o de tres vías en función de las reacciones que se busca favorecer con cada uno de ellos. El calificativo de vías hace alusión al número de contaminantes que es capaz de convertir por lo que, a los catalizadores de oxidación se les conoce también como catalizadores de dos vías.

- Catalizadores de oxidación: incluyen paladio y platino como sustancias catalizadoras. Si finalidad es oxidar por completo los HC sin quemar y el CO; aunque, desde los 90, también se diseñan para reducir las emisiones de la fracción orgánica soluble de las partículas (FOS) y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH). Su capacidad para reducir los NOx es despreciable. Funcionan de manera óptima en motores que trabajan con mezcla pobre, y tratan complementariamente los NOx con otros sistemas como el EGR. Son mayoritariamente usados en motores de encendido por compresión, y se les conoce como DOC (Diesel Oxidation Catalyst). Su principal problemática es el comportamiento con el azufre contenido en el combustible, que da lugar a moléculas de SO<sub>2</sub> en los gases de escape. Estas moléculas pueden convertirse en SO<sub>3</sub> actuando la alúmina del recubrimiento como catalizador de esta reacción, y acumulándose en el catalizador envenenándolo o dando lugar a ácido sulfúrico al reaccionar con el vapor de agua. Este es uno de los motivos por los que se limita el contenido de azufre en los combustibles.

Si operan con mezcla rica, el problema de los NOx se reduce, aunque se hace necesaria la adición de aire del exterior para completar las reacciones.

- Catalizadores de reducción: su finalidad es la reducción de los NOx, por lo que su sustancia catalizadora más efectiva es el rodio. Se instalan en motores que operan con mezclas ricas, ya que la presencia de oxígeno en los gases de escape los desactiva.
- Catalizadores de tres vías: están diseñados para operar con gases provenientes de mezclas estequiométricas. En su interior, se reducen las emisiones de NOx, CO y HC. Para ello, deben darse en su interior reacciones de reducción y oxidación de manera simultánea; por lo que incluyen paladio, platino y rodio. Para que la conversión de los tres contaminantes tenga un rendimiento aceptable, la mezcla que llega al motor debe tener el dosado realtivo en un rango de valores muy estrecho (entre 0.998 y 1.007 para rendimientos superiores al 80%), por lo que se les conoce también como catalizadores de tres vías de bucle cerrado o con sonda lambda; ya que deben incorporar sondas de este tipo para realizar el control retroalimentado del combustible inyectado. En la práctica, suelen instalarse dos sondas lambda, una antes y otra después del catalizador debido a que están expuestas a la gran suciedad de los gases de escape. La sonda que se coloca aguas abajo del catalizador está menos expuesta a la suciedad pero, debido a los largos recorridos de los gases de escape, la reacción del control se hace más lenta. En la figura 4-7 se muestra un esquema de la ubicación de ambas sondas en la línea de escape de un vehículo:

Si operan con mezcla rica, por encima del dosado estequiométrico, se eliminan los NOx, pero se penaliza el rendimiento de las reacciones de oxidación; mientras que, si el dosado de la mezcla está por debajo del límite inferior anterior, se oxidan los HC y el CO pero se agrava el efecto de los NOx. En la figura 4-8 se muestra de forma esquemática el funcionamiento de un catalizador de tres vías, con los gases que reaccionan en su interior:

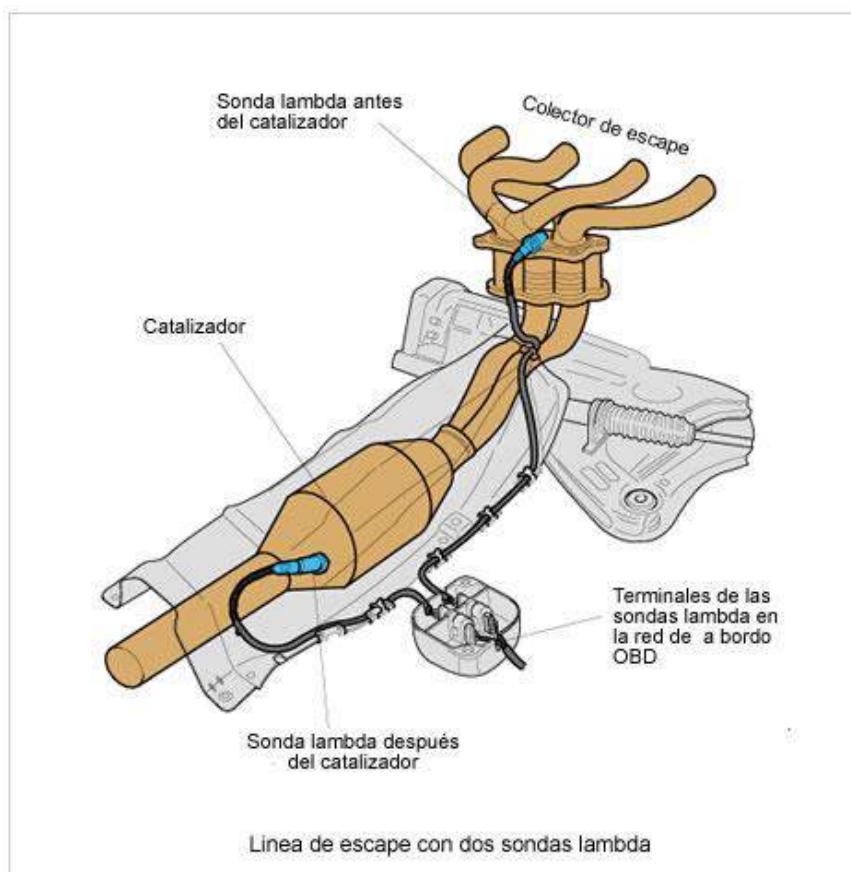


Figura 4-7: Esquema de la ubicación de las sondas lambda en un vehículo.

Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/sonda-lambda.htm>

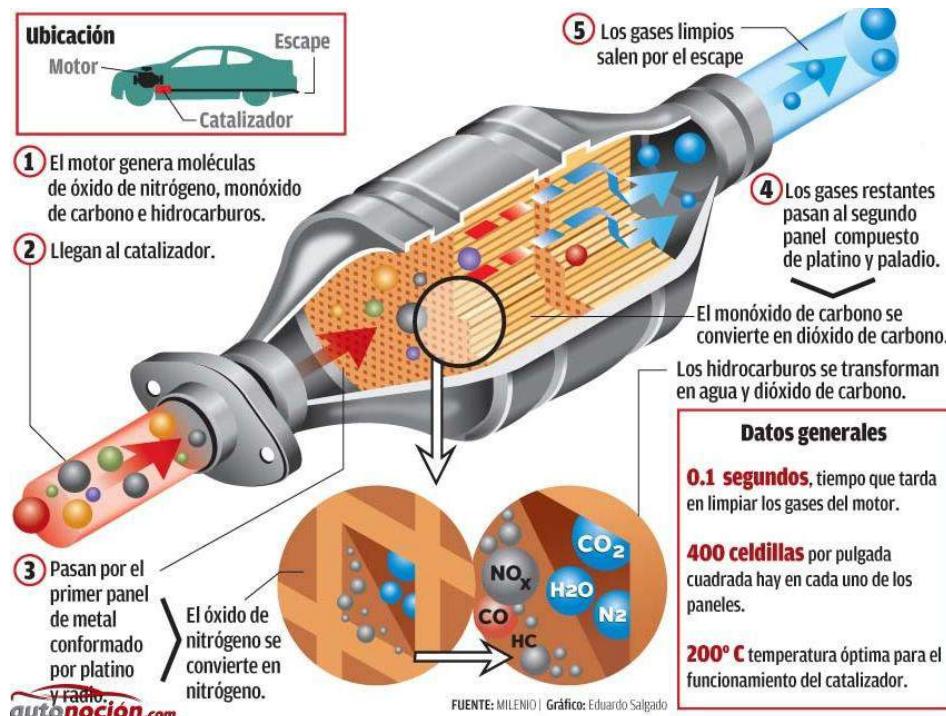


Figura 4-8: Representación esquemática del interior de un catalizador de tres vías durante su funcionamiento.

Fuente: <http://www.autonocion.com/ocio-tu-catalizador-puede-estar-en-peligro-los-robos-se-han-multiplicado-con-la-crisis/#close>

En la figura 4-9 se muestran las reacciones que tienen lugar en el interior de los catalizadores de tres vías para reducir los contaminantes. En la misma figura, se representa también la concentración de cada contaminante antes y después del catalizador en función de la relación de aire / combustible en la mezcla:

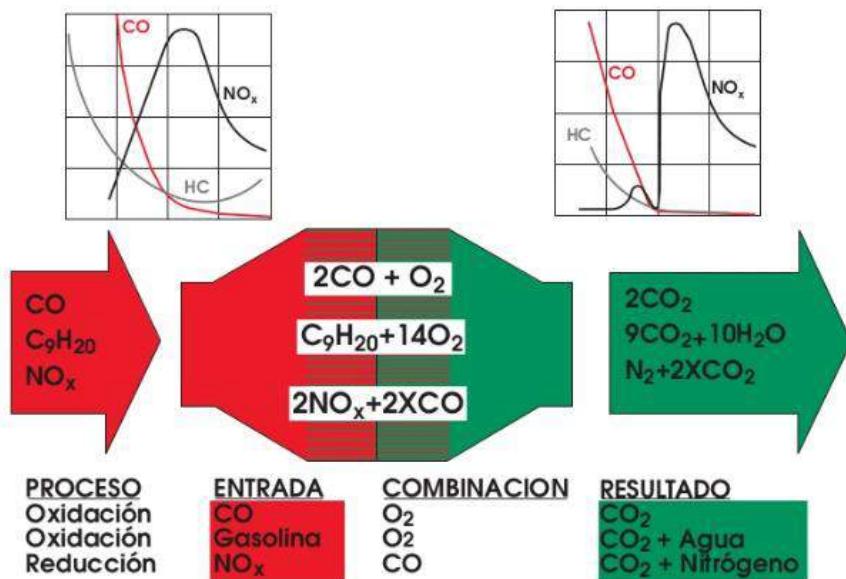


Figura 4-9: Reacciones que tienen lugar en el interior del catalizador de tres vías y concentraciones de cada contaminante en función del parámetro lambda.

Fuente: <http://es.slideshare.net/gonguibri/info-catalizador-7245066>

En la figura 4-10 se muestra la sección ampliada de un reactor catalítico de tres vías con paladio y rodio, con los distintos catalizadores de diferentes colores:

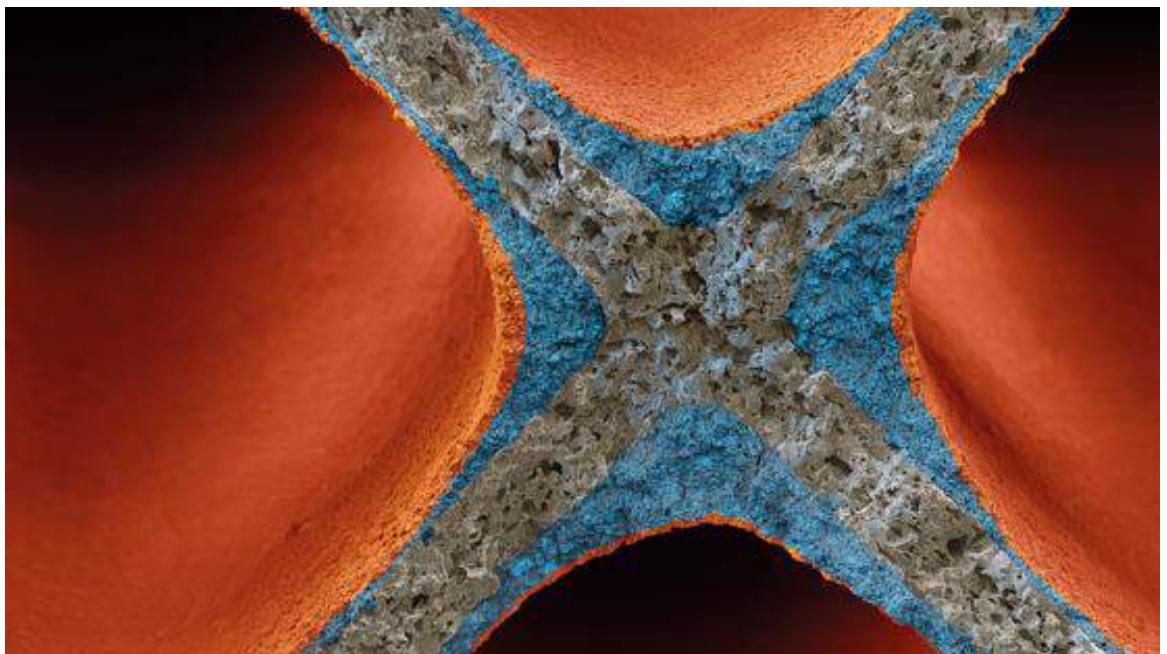


Figura 4-10: Sección ampliada de un catalizador de tres vías con sus partes de diferentes colores. Desde el interior hacia el exterior: sustrato cerámico (gris), paladio (azul) y rodio (rojo).

Fuente: <https://www.bASF.com/en/company/news-and-media/science-around-us/catalytic-converter.html>

La principal problemática de los catalizadores reside en las impurezas de los combustibles y lubricantes. Éstos dan lugar durante la combustión a sustancias que reaccionan con los catalizadores y pueden llegar a desactivarlos, como el plomo y el azufre en los combustibles o el calcio, el cinc y el fósforo del aceite. Estas impurezas, además de desactivar la capacidad catalizadora de los metales preciosos, se acumulan en el interior de los canales reduciendo la superficie de contacto entre el gas y el catalizador. Otro problema es la desactivación térmica por altas temperaturas que se da cuando tiene lugar el apagado de llama en mezclas pobres y el corte de encendido en MEP, que conllevan a la entrada y combustión de la mezcla en el interior de los catalizadores.

#### 4.1.3 Reactores químicos

Su funcionamiento consiste en eliminar algún contaminante haciéndolo reaccionar químicamente con algún compuesto que se le añade. El más extendido es el que inyecta amoníaco para reducir las emisiones de NOx en atmósferas oxidantes, denominado sistema de reducción catalítica selectiva (SCR).

Esta tecnología fue empleada por primera vez en plantas de vapor con el objetivo de limpiar los óxidos de nitrógeno (NOx) de los gases de escape. En 2006, la tecnología se introdujo con éxito en el mercado europeo de los vehículos Diesel industriales, y permitió que los camiones pudieran cumplir con los límites establecidos en las normas Euro IV y Euro V.

Para ello, los vehículos (o motores estacionarios) deben incorporar un depósito adicional de AdBlue, una solución de urea al 32.5% en agua desionizada, y un sistema de conversión de la misma a amoníaco mediante hidrólisis. Además, suelen incorporar un catalizador de oxidación de seguridad a continuación del sistema SCR para evitar las posibles emisiones de amoníaco.

A continuación, en la figura 4-11 se muestra un detalle esquematisado de la pieza en la que se mezcla la inyección de AdBlue con la corriente de gases de escape de un vehículo:

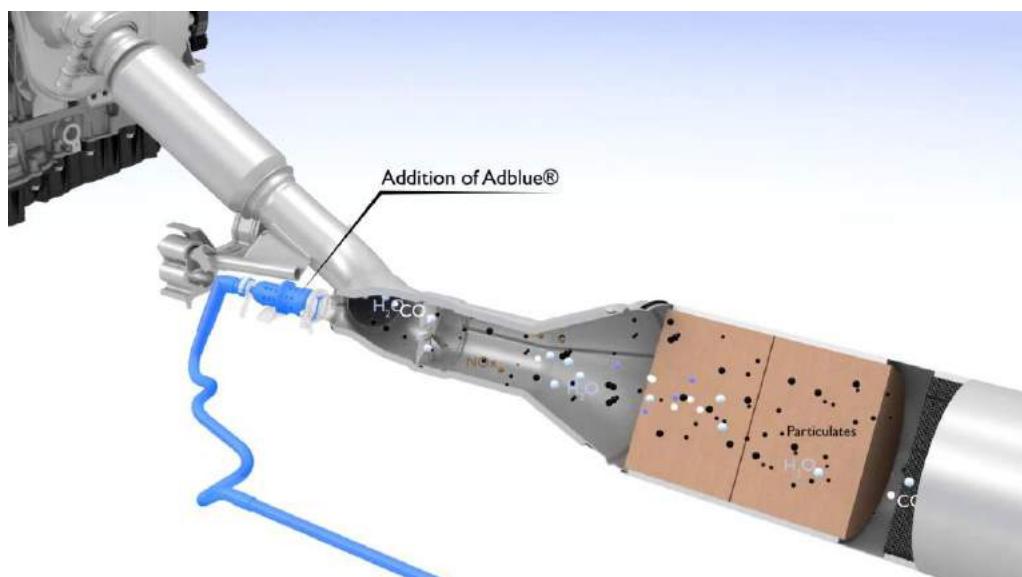
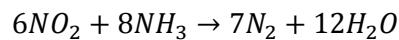
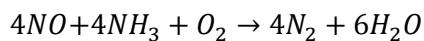
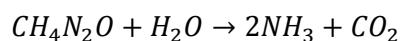


Figura 4-11: Detalle de la adición de AdBlue a la corriente de gases de escape.

Fuente: <http://noticias.coches.com/consejos/que-es-adblue/174942>

Las reacciones que se dan en su interior son las siguientes:



En la figura 4-12 se muestra un esquema de un sistema de SCR completo acoplado a la vía de escape de un vehículo:

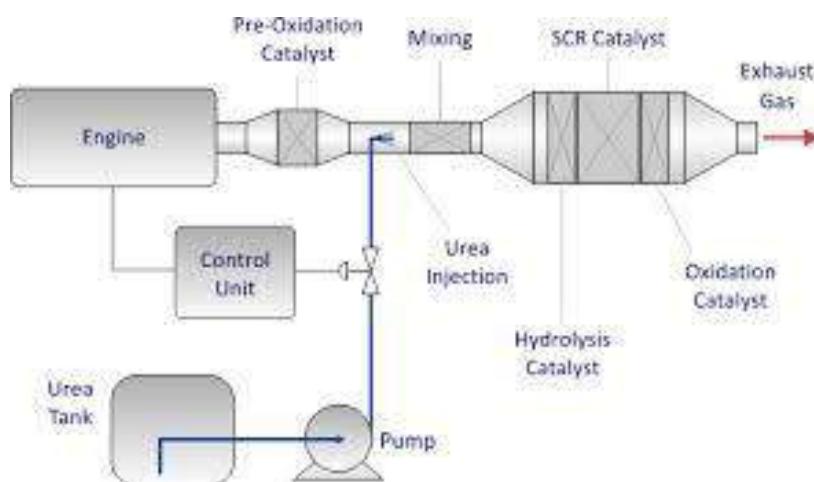


Figura 4-12: Sistema de reducción catalítica selectiva.

Fuente: [https://www.dieselnets.com/tech/cat\\_scr\\_mobile.php](https://www.dieselnets.com/tech/cat_scr_mobile.php)

## 4.2 Filtros

Son elementos que retienen y almacenan un contaminante determinado, ya sean gases o partículas, evitando su

emisión al exterior durante el funcionamiento de los motores. Deben ser regenerados para evitar su colapso. Según su principio de funcionamiento, se dividen en químicos y físicos:

#### 4.2.1 Filtros químicos

Su interior es similar a los catalizadores anteriormente descritos. Estos filtros hacen reaccionar algún gas contaminante con los elementos presentes en el sustrato del catalizador, reteniéndolos en su interior. El caso más frecuente es el de reducción de emisiones de NOx en atmósferas pobres. Para ello, se acumula en forma de nitrato en el recubrimiento del catalizador durante la operación del motor con mezcla pobre. Una vez que se satura, es necesario operar brevemente con mezcla rica para regenerarlos. En la figura 4-13 se muestra un esquema del funcionamiento de un dispositivo de este tipo:

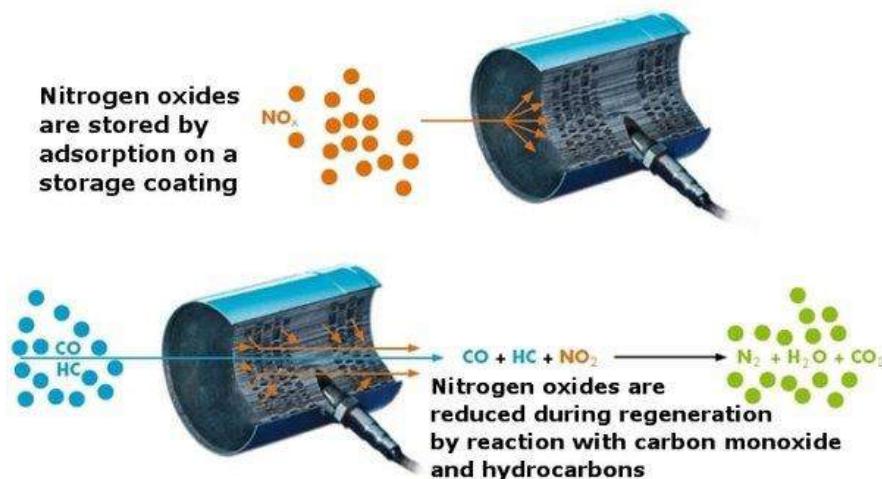


Figura 4-13: Funcionamiento básico de un sistema de acumulación de NOx.

Fuente: <http://www.emitec.com/en/technology/product-applications/nox-adsorber/>

Funcionan tanto en motores de gasolina como en motores Diesel, y se los conoce comúnmente como NOx Storage – Reduction (NSR) o Lean NOx Traps (LNT). Para su regeneración, se inyecta combustible directamente en el colector de escape o durante la expansión en el cilindro.

Su problemática se basa en el rápido envenenamiento por azufre y en el estrecho rango de grados de carga admisible para su buen funcionamiento.

#### 4.2.2 Filtros físicos

Los filtros físicos, también conocidos como filtros de partículas, se usan en la reducción de emisiones de estas últimas, reteniéndolos en su interior durante la operación de los motores, y siendo necesaria su regeneración cada cierto tiempo, para evitar la saturación de los mismos, que provoca gran resistencia al paso del aire y afecta a las prestaciones del motor.

Los más efectivos son los de monolito cerámico y los de arrollamiento de fibra cerámica. Los primeros, constructivamente, son similares a los monolitos usados en los catalizadores, pero con el extremo de los canales obstruido, por lo que se obliga a los gases a atravesar las paredes de los mismos, que son porosas en este caso, para atrapar las partículas. Además, en algunos casos se incorpora material catalizador a dichas superficies porosas para reducir las emisiones de gases, además de las de partículas. En la figura 4-14 se esquematiza el principio de funcionamiento de estos filtros de partículas.

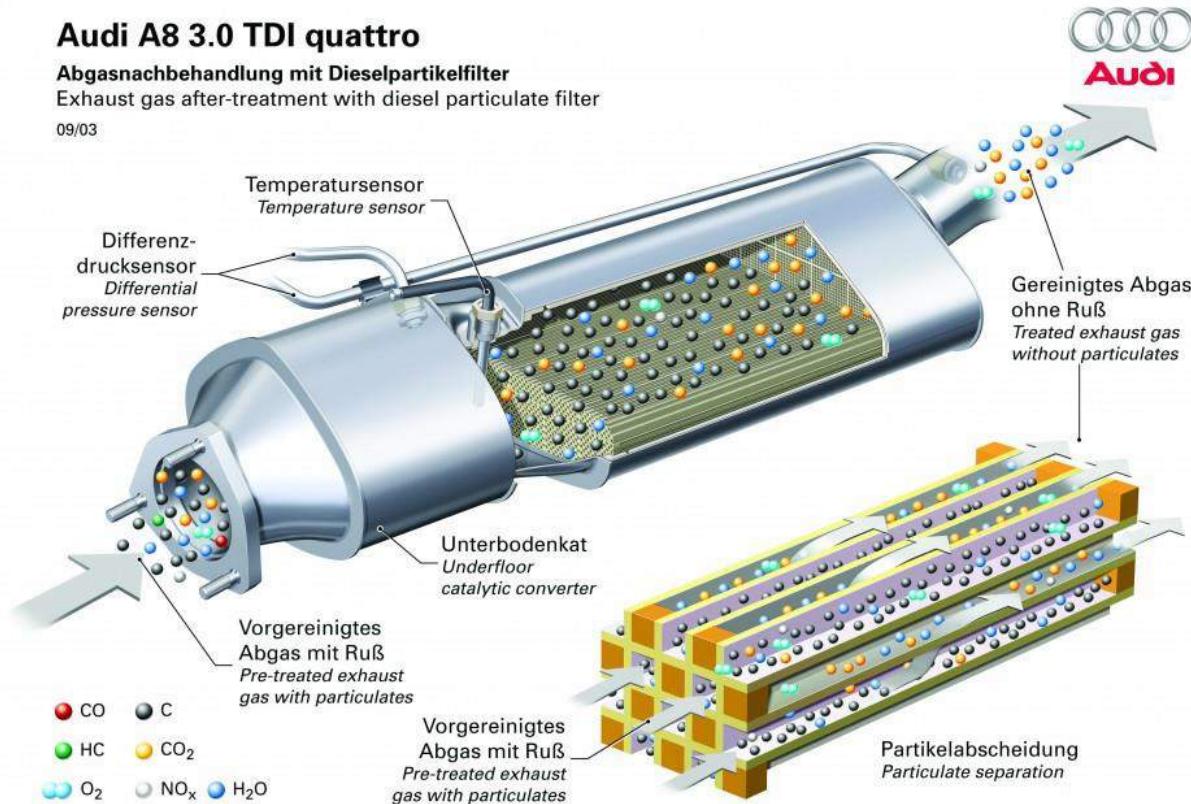


Figura 4-14: Filtro de monolito cerámico.

Fuente: <http://www.autoevolution.com/news/how-the-diesel-particulate-filter-works-90866.html>

Se distingue entre dos regímenes de filtrado: en lecho profundo o superficial. En el primer caso, las partículas son de menor tamaño que los poros, así que penetran en los mismos y se quedan adheridas al sustrato. El filtrado superficial se da cuando las partículas son de mayor tamaño que el poro. Según se va saturando el filtro, predomina el filtrado superficial.

La regeneración de los mismos consiste en oxidar las partículas de hollín dando lugar a CO<sub>2</sub> y agua. Para ello, se necesitan temperaturas de unos 700°C, superiores a las que llevan los gases de escape en esta última etapa. Por tanto, surgen varias estrategias de regeneración agrupadas en dos bloques.

- Regeneración activa: consiste en hacer que se alcancen en determinados momentos las altas temperaturas que permiten la oxidación del hollín. Esto puede, a su vez, alcanzarse mediante distintos procedimientos. Uno de ellos consiste, al igual que en el caso de los filtros químicos, en inyectar combustible en la etapa de expansión en el cilindro o en el colector de escape. Otra medida es calentar el flujo de gases con resistencias eléctricas, con microondas, etc. También hay sistemas que incorporan un quemador en el propio filtro.
- Regeneración pasiva: su funcionamiento consiste en hacer que la temperatura necesaria para la oxidación disminuya hasta valores alcanzables por los gases de escape durante la operación normal del motor. Suelen incluirse sustancias catalizadoras en el filtro para conseguir dicho efecto.

En la actualidad, lo más frecuente es llevar a cabo una regeneración mixta, con el objetivo de mejorar la vida útil del filtro sin aumentar el consumo de combustible de manera significativa.

En la figura 4-15 se representa el último sistema de filtrado de partículas de regeneración continua desarrollado por Scania:

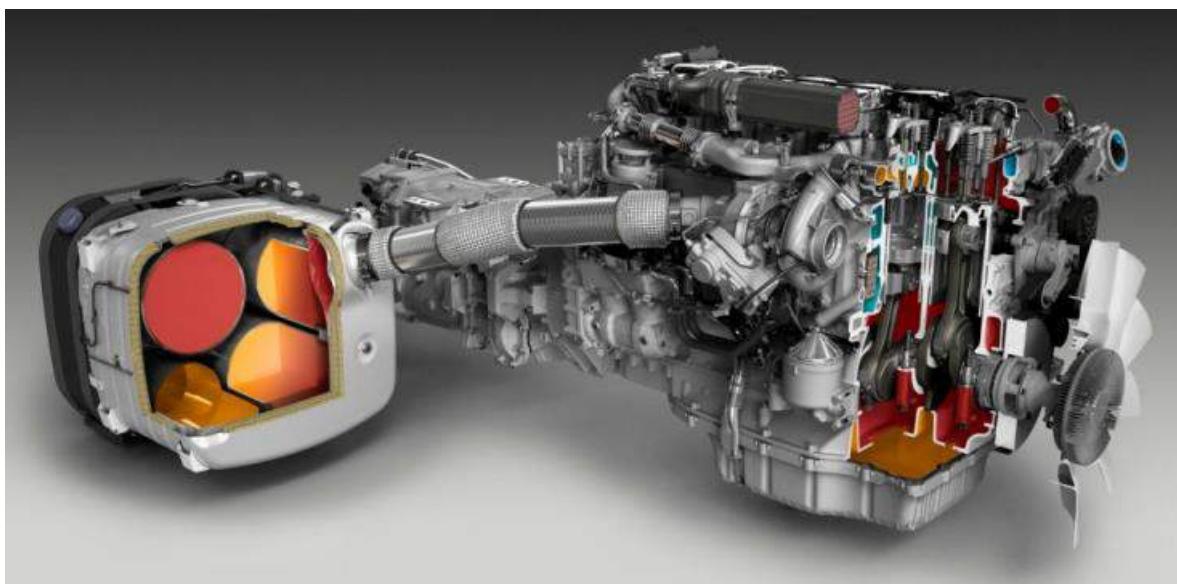


Figura 4-15: Filtro de partículas seccionado incorporado en un motor Scania Euro 6.

Fuente:[http://www.scania.es/Images/P11301ES%20Euro%206%20engines%20ready%20for%20the%20mark%et\\_tcm64-240654.pdf](http://www.scania.es/Images/P11301ES%20Euro%206%20engines%20ready%20for%20the%20mark%et_tcm64-240654.pdf)

En la tabla 4-1 se relacionan los sistemas de control de emisiones más importantes con los contaminantes que tratan en cada tipo de motor:

Tabla 4-1: Tipos de contaminantes tratados según motor y tecnología utilizada.

Tecnología	Motores de gasolina / motores de gas	Motores Diesel / motores de gasolina con mezcla pobre
Catalizador de 2 vías (oxidación)	CO, HC	CO, HC, PM
Catalizador de 3 vías (NSCR)	CO, HC, NOx	-
Reducción catalítica selectiva (SCR)	-	NOx
Filtros químicos (NSR, LNT)	-	NOx
Filtros de partículas Diesel (DPF)	-	CO, HC, PM (Diesel)

Fuente: <http://ect.jmcatalysts.com/emission-control-technologies>

Esta tabla sirve como introducción a los capítulos siguientes, en los que se tratarán con mayor grado de detalle los sistemas usados en cada tipo de motor para el control de sus emisiones.



# 5 METODOLOGÍA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES EN MECH

**A** la hora de reducir las emisiones de gases contaminantes, un procedimiento es minimizar la formación de los mismos durante la combustión; lo que se conoce como solución activa. La otra opción es, una vez formados, evitar su salida a la atmósfera reteniéndolos y transformándolos en otros gases inocuos; solución pasiva generalmente denominada postratamiento.

Los MECH de inyección indirecta suelen operar con mezclas estequiométricas con las cuales los catalizadores de tres vías funcionan bastante bien en la reducción de emisiones de CO, HC y NOx. En cambio, los de inyección directa trabajan con dosados pobres que obligan a usar otro tipo de postratamiento.

## 5.1 Soluciones activas

Existen dos métodos para reducir la formación de contaminantes en este tipo de motores. El primero consiste en conseguir un dosado cercano a la unidad para posibilitar el funcionamiento de la posterior solución pasiva: el catalizador de tres vías. El segundo método, que se da en motores de inyección directa, consiste en trabajar con mezclas pobres que aseguren bajos niveles de CO y HC, además de valores reducidos de emisiones de NOx al disminuir la temperatura por la elevada dilución con aire. En este caso, se incluyen dos sistemas post tratamiento que tratarán por separado las emisiones de CO y HC por un lado y las de NOx por otro. En la figura 5-1 se muestra la variación de la concentración de contaminantes en función del dosado relativo para motores de encendido provocado. Como se puede comprobar, las menores concentraciones de contaminantes se dan para rangos pobres de dosado, próximos a 0.7.

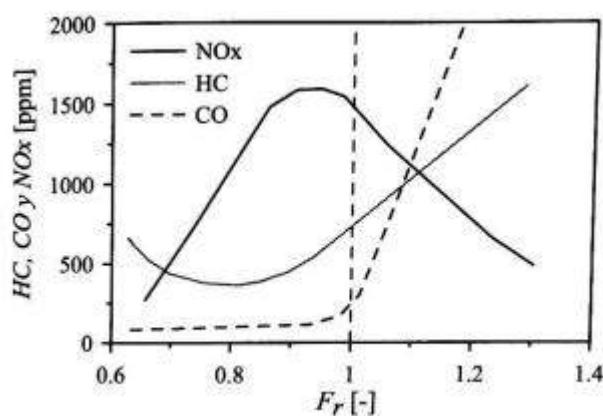


Figura 5-1 Concentración de gases contaminantes en función del dosado.

### 5.1.1 Inyección indirecta

En los motores en los que la inyección de combustible tiene lugar en el colector, la mezcla aire-combustible suele ser estequiométrica excepto cuando trabajan a plena carga, así que el catalizador de tres vías suele funcionar bastante bien. Las soluciones activas en este tipo de motores suelen pasar a un segundo plano,

centrándose únicamente en las siguientes acciones:

- Asegurar en todo momento el dosado relativo cercano a la unidad, que se consigue gracias al control electrónico de la inyección de combustible retroalimentado con la sonda lambda, que mide el nivel de oxígeno en los gases de escape. El control preciso del dosado tiene como finalidad asegurar el funcionamiento del posterior catalizador de tres vías con un rendimiento aceptable. Para ello, el dosado debe estar en un margen muy estrecho, como se puede apreciar en la figura 5-2:

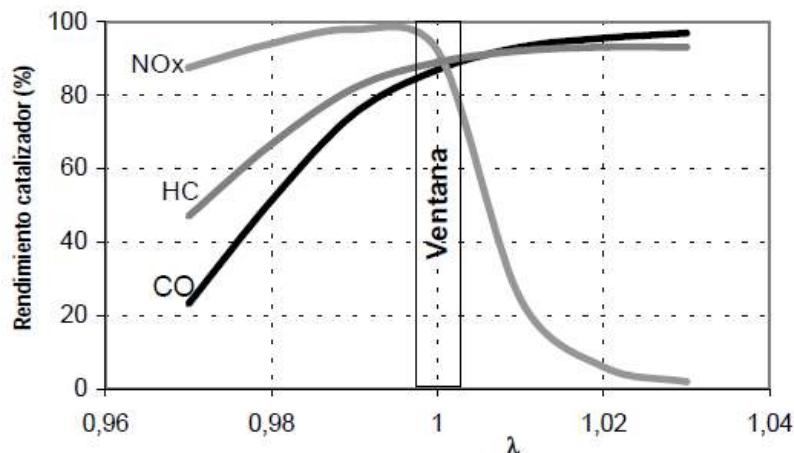


Figura 5-2: Rendimiento de la conversión de NOx, CO y HC con un catalizador de tres vías en función de la inversa del dosado (parámetro lambda).

- Reducir el tiempo de calentamiento del posterior catalizador de tres vías, que sólo funciona bien cuando opera a temperatura suficiente. Esto se puede conseguir colocando el catalizador lo más cerca posible del motor, retrasando el encendido, inyectando aire secundario en el escape para provocar una postcombustión, etc.

Aun así, el diseño de estos motores debe ser tal que se reduzca todo lo posible la formación de contaminantes durante la combustión. Algunas medidas destinadas a tal efecto son:

- Minimizar la relación superficie/volumen y eliminar intersticios en la cámara de combustión ayuda a disminuir la formación de HC.
- Reducir el tamaño de los cilindros posibilita realizar la combustión a menor temperatura, lo que conlleva menores emisiones de NOx.
- Bajar la relación de compresión tiene dos efectos positivos: por un lado, baja la relación superficie/volumen, y aumenta la temperatura de los gases de escape, lo que contribuye a la eliminación de CO y HC. Por otro, esto conlleva menores temperaturas de combustión; por lo que, como se ha comentado anteriormente, se reducen las emisiones de NOx.
- Incluir sistemas de distribución variable, que permita modificar el cruce de válvulas en función del grado de carga. Con ángulos pequeños de cruce de válvulas, se retienen en el cilindro gases residuales del ciclo anterior, que hacen disminuir la temperatura de combustión, con la correspondiente reducción en la formación de NOx. Sin embargo, este efecto lleva asociado un aumento de las emisiones de HC, por lo que resulta bastante útil ir variando el cruce de válvulas para conseguir simultáneamente bajos niveles de ambos contaminantes.
- Reducir el tamaño de los motores o incluir sobrealimentación conlleva menos emisiones de HC y de CO a carga parcial.
- Los sistemas usados para reducir el consumo repercuten también en la reducción de emisiones; por tanto, se puede decir que los ciclos de Atkinson y de Miller, por poner un ejemplo, contribuyen también a disminuir la formación de gases contaminantes en este tipo de motores.

### 5.1.2 Inyección directa

En este tipo de motores, las soluciones activas tienen un papel fundamental, ya que pueden operar con carga estratificada, y el dosado suele ser pobre. Por ello, suelen ir enfocadas a reducir la formación de NOx durante la combustión y son muy diversas, como se indica a continuación:

- En primer lugar, son válidas la mayoría de las soluciones del apartado anterior, especialmente las medidas enfocadas a minimizar la formación de NOx, como la reducción del tamaño de los cilindros y de la relación de compresión o los sistemas de distribución variable.
- La propia inyección directa, que permite operar con mezclas pobres, puede considerarse en sí misma como una solución activa; ya que disminuye la formación de CO, HC y NOx, como se ha comentado a lo largo de esta sección. Por otra parte, la presión de dicha inyección tiene un papel importante en cuanto a la formación de partículas durante la combustión, ya que cuanto mayor es la presión, mejor es la pulverización del combustible inyectado y, por tanto, las gotas son de menor tamaño, por lo que se evaporan más rápido. El comienzo de la inyección, la cantidad de combustible inyectado, la temperatura, etc también repercuten en las emisiones de estos motores. (Überall , Otte, Eilts, & Krahl, 2015)
- Además de las soluciones anteriores, hay una medida que se aplica mayoritariamente en motores de inyección directa: la recirculación de gases de escape (EGR). Existen dos tipos de EGR: uno interno y otro externo. El interno se refiere a la presencia de gases residuales de la combustión anterior en el cilindro como consecuencia de un barrido incompleto, bajo cruce de válvulas, etc. Sin embargo, por EGR suele entenderse EGR externo, que además es el más empleado. Consiste en la introducción de gases inertes en la cámara de combustión.

Este mecanismo tiene varios efectos beneficiosos: reducir el consumo a carga parcial, reducir el riesgo de autoencendido de mezcla y reducir la formación de NOx durante la combustión. Este último es el que justifica la inclusión del EGR en este apartado. Las causas de dicho efecto son las siguientes: por un lado, los gases residuales absorben calor del resto de gases, lo que se favorece más aún si se hace una refrigeración intermedia. Además, dichos gases tienen mayor calor específico que el aire, ya que contienen CO<sub>2</sub> y vapor de agua y, al ser inertes, reducen la velocidad de reacción, por lo que también se contribuye a minimizar la temperatura máxima de la reacción. El sistema se suele desconectar en tres casos: bien al principio de la marcha, cuando las temperaturas son aun bajas, bien a ralentí, para evitar la formación de HC o bien a plena carga para favorecer la entrada de una mayor cantidad de mezcla rica.

Las contrapartidas de este sistema son un leve aumento en las emisiones de CO y partículas, inestabilidad durante la combustión con el mayor retraso de la ignición o disminución de la potencia entre otras. Además, en motores Diesel, acelera la degradación del aceite lubricante del motor, aumentando el número de partículas contenidas en el mismo y degradando la viscosidad.

Existen dos métodos para conectar el escape con la admisión: en uno de ellos, conocido como EGR de alta presión, se comunican los colectores de escape y admisión, por lo que también se denomina de ruta corta. En el otro, conocido como de baja presión o ruta larga, se conecta la línea de escape con la admisión antes del compresor. Pueden observarse ambos tipos de sistemas en la figura 5-3:

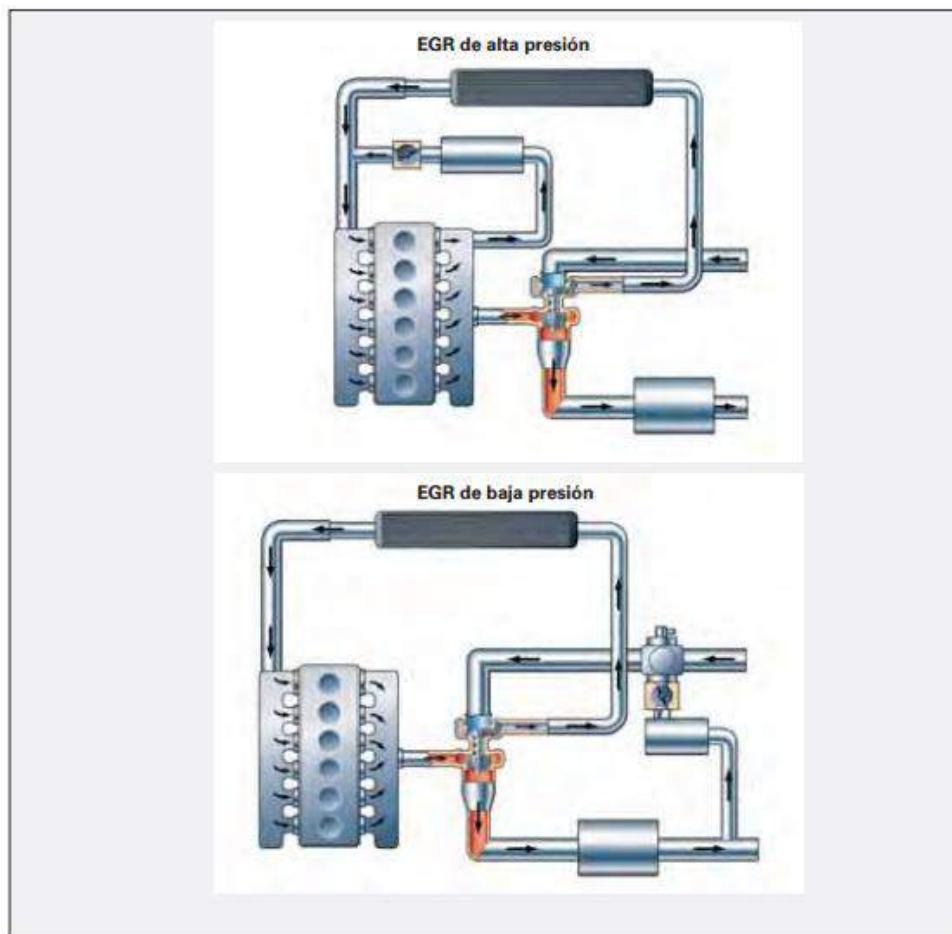


Figura 5-3: Esquemas de sistemas de recirculación de gases de escape de alta (arriba) y baja (abajo) presión.

Fuente: Johnson Matthey (copyright).

[http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Publicaciones/Cuadernos/4%202011/Calidad\\_del\\_aire\\_urbano\\_salud\\_y\\_trafico\\_rodado.pdf](http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Publicaciones/Cuadernos/4%202011/Calidad_del_aire_urbano_salud_y_trafico_rodado.pdf)

Como consecuencia de las soluciones anteriormente comentadas, los MEP de última generación suelen ir orientados, además de a la inyección directa, a la reducción de la cilindrada y a la sobrealimentación. Con estas características, actualmente hay en el mercado motores como los ecoboost de Ford, que con una capacidad de 1 litro repartida en 3 cilindros y distribución variable que incluye la desactivación de cilindros, consiguen sacar 125 CV y un consumo homologado de 5 l/100km; o los TSI de Volkswagen, que incorporan un sistema de dos compresores con los que se obtienen 122 CV/l: uno volumétrico accionado por el motor que funciona a bajo régimen de giro del mismo (hasta 3500 rpm), y un turbocompresor que funciona a partir de dicho régimen.

## 5.2 Soluciones pasivas

En este punto, es importante diferenciar entre emisiones de gases y partículas formadas durante la combustión en el motor, y emisiones de gases que tienen lugar en otros elementos. Dentro de estas últimas se engloban las emisiones de evaporación que tienen lugar en las paradas del motor y las emisiones de gases de cárter que incluyen gases que provienen del aceite y de las fugas en el motor. Sin embargo, este trabajo se centrará en los sistemas posttratamiento destinados a minimizar las emisiones de los primeros.

Como se ha comentado con anterioridad, las soluciones pasivas tienen como finalidad impedir la salida parcial o total de ciertos contaminantes formados durante la combustión. Este objetivo se puede lograr activando ciertas reacciones, como las de oxidación, elevando la temperatura de los gases como ocurre en el caso de los

reactores térmicos; o bien acelerando ciertas reacciones a una temperatura distinta de la de equilibrio mediante el uso de catalizadores (reactores catalíticos). Otra opción consiste en añadir un compuesto que reaccione con un contaminante determinado dando lugar a un producto inocuo, que se da en reactores químicos. Por último, para acumular y evitar la salida de ciertos contaminantes se usan filtros físicos y químicos.

La composición de los gases de escape y en particular la presencia o ausencia de oxígeno en los mismos condiciona los tipos de sistemas postratamiento viables. Por esta razón, en este apartado de motores de encendido por chispa, se estudian por separado los motores de inyección directa e indirecta.

A continuación se detallan los distintos sistemas postratamiento que se pueden usar en según el tipo de inyección de combustible.

### **5.2.1 Inyección indirecta**

Estos motores suelen operar con mezclas estequiométricas así que, por lo general, no presentan oxígeno en los gases de escape. Por esta razón, son ideales para trabajar con catalizadores de tres vías, que reducen simultáneamente las emisiones de CO, HC y NOx, aunque el control de las emisiones de este último se perjudica con la presencia de oxígeno, por lo que debe hacerse un control preciso de la inyección que mantenga el dosado relativo muy próximo a la unidad.

Otra estrategia para la reducción de emisiones en MEP de inyección indirecta consiste en instalar un catalizador de reducción, que minimiza las emisiones de NOx siempre que la mezcla sea rica, seguido de otro de oxidación precedido de una entrada intermedia de aire para suministrar el oxígeno necesario para oxidar el CO y los HC. Esta configuración se conoce también como catalizador de tres vías de bucle abierto o con toma de aire.

### **5.2.2 Inyección directa**

En cuanto a los sistemas de tratamiento de gases de escape, estos motores son bastante parecidos a los Diesel, ya que suelen operar con exceso de aire.

En primer lugar, el exceso de aire favorece la eliminación del CO y HC en reactores de oxidación.

La técnica de postratamiento de reducción de NOx consiste en la instalación de filtros químicos, que los retienen y almacenan durante la operación con mezcla pobre, aunque necesitan operar puntualmente con mezcla rica para ser regenerados.

Por último, pueden instalarse filtros para reducir las emisiones de partículas, sobre todo si los motores van alimentados de combustible líquido.



## 6 METODOLOGÍA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES EN MEC

**L**a principal diferencia entre estos motores y los MECH es que, en este caso, en lugar de provocar el encendido de la mezcla mediante la bujía, la mezcla se autoinflama cuando se alcanza la presión crítica.

En la actualidad, en España, casi dos tercios del total de vehículos son Diesel. Lo mismo ocurre en la mayoría de países europeos donde, al contrario de lo que ocurre en Japón y Estados Unidos, el mercado de vehículos Diésel ha tenido un auge muy importante a lo largo de los últimos años motivado por sus elevadas prestaciones, reducido consumo e incluso, en algunos países, descenso del precio del combustible por bajada de impuestos al gasóleo. En la figura 6-1 se observa la tendencia comentada anteriormente, conocida como dieselización:

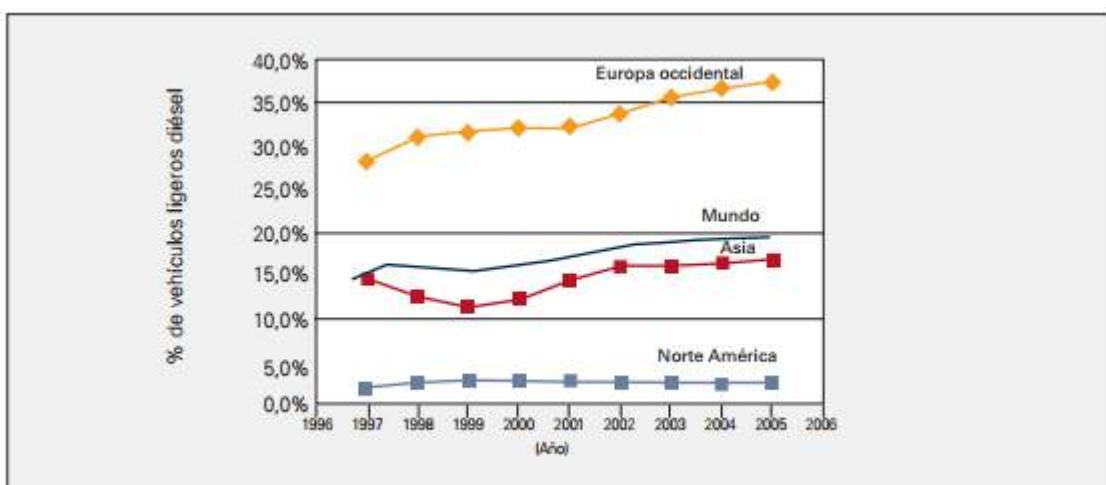


Figura 6-1: Dieselización del parque de vehículos ligeros en Europa entre 1996 y 2006.

Fuente: Congreso FISITA 2004, Barcelona 2004.

[http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Publicaciones/Cuadernos/4%202011/Calidad\\_del\\_aire\\_urbano\\_salud\\_y\\_tráfico\\_rodado.pdf](http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Publicaciones/Cuadernos/4%202011/Calidad_del_aire_urbano_salud_y_tráfico_rodado.pdf)

Al igual que en el capítulo anterior, puede hacerse una clasificación de los MEC atendiendo al sistema de inyección: directa o indirecta. En cualquier caso, para la correcta combustión se precisa, además de presión y temperatura, una mezcla de aire y combustible cuya proporción se encuentre dentro de los límites de inflamabilidad. En los de inyección directa, la mezcla de los dos componentes se favorece mediante la pulverización del combustible inyectado, precisándose para ello sistemas de inyección de elevadas prestaciones capaces de introducir el combustible a una presión elevada que minimice el diámetro de las gotas del mismo. En el caso de los motores Diesel de inyección indirecta, la inyección de combustible se hace en la precámara, consiguiéndose grandes turbulencias que favorecen el proceso de mezcla; por lo que se usan sistemas de inyección de menores prestaciones. Sin embargo, en la actualidad, la mayoría de motores Diesel usados en automóviles son de inyección directa debido a los avances conseguidos en los sistemas de

inyección, que permiten fabricar motores más eficientes con menor consumo y emisiones.

En este capítulo, por tanto, no se diferenciará como en el caso anterior entre motores de inyección directa e indirecta para estudiar los mecanismos de reducción de emisiones, ya que no presentan grandes diferencias en su composición de aire y combustible, como ocurre en los MEP. En este caso, ambas variantes operan con mezclas pobres.

## 6.1 Soluciones activas

A continuación se describen los elementos de un MEC cuyo diseño influye en la formación de contaminantes, y de que forma lo hacen. Al igual que en MECH de inyección directa, al operar con gran exceso de aire, las emisiones de NOx se favorecen, así que la reducción de la temperatura de combustión vuelve a ser una de las principales soluciones.

El diseño de la cámara de combustión debe favorecer la mezcla de aire y combustible para evitar que se produzcan dosados locales muy altos que favorecen la formación de hollín y aumentan las emisiones de humos. Para ello, se diseñan de forma conjunta la cámara tallada en el cilindro y la posición del inyector, generalmente centrada, para evitar que el combustible entre en contacto con las paredes (frías) del cilindro.

Uno de los sistemas que colaboran con la reducción de la temperatura es el intercooler: un intercambiador de calor que se coloca a la salida del compresor para enfriar el aire de admisión.

Otro sistema ampliamente extendido en MEC es el EGR, explicado en el capítulo anterior.

La inyección es el patrón que aporta mayor libertad para afectar a la combustión. Por una parte, la presión de la misma afecta en el tamaño de las gotas de combustible; por lo que, generalmente, mayores presiones generan gotas más finas que se mezclan y arden más rápido, reduciéndose así la formación de hollín, pero aumentando la de NOx, al aumentar la temperatura de combustión. Por otra parte, la distribución del combustible inyectado a lo largo del tiempo influye también en gran medida sobre la formación de estos dos contaminantes. A continuación se exponen varias estrategias de inyección con sus repercusiones correspondientes en la formación de dichos contaminantes.

- HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition): consiste en suministrar todo el combustible antes de que tenga lugar la ignición de la mezcla. Al premezclarse el aire y el combustible, se eliminan puntos en los que el dosado local sea rico, por lo que no se forma hollín. Además, la formación de NOx se limita debido a las contenidas temperaturas que se alcanzan. Esta estrategia no funciona bien con altos grados de carga del motor, que conllevan la inyección de gran cantidad de combustible; lo que dificulta la mezcla.
- PPC (Partially Premixed Combustion): este mecanismo se basa en inyectar una parte del combustible antes de la ignición y otra parte después, de forma que se da inicialmente una llama de premezcla, sin emisiones de hollín, posteriormente gobernada por la difusión, lo que limita la temperatura. Con esta estrategia se consigue, por tanto, controlar la formación de los dos contaminantes más problemáticos de los motores Diesel. El inconveniente de este mecanismo, al igual que en el anterior, es la dificultad de su aplicación para rangos elevados de carga.
- LTC (Low Temperature Combustion): Esta estrategia, a diferencia de las otras dos, no consta de una etapa de premezcla, sino que predomina la difusión en todo momento. Como consecuencia, las temperaturas se reducen. Además, la reducción de la temperatura se respalda con la recirculación de gases de escape hacia los conductos de admisión. La consecuencia de este mecanismo es, como cabe esperar, la reducción de NOx.

En la figura 6-2 se observa la ubicación de la mezcla lograda con cada una de las estrategias anteriores para explicar su relación con cada contaminante.

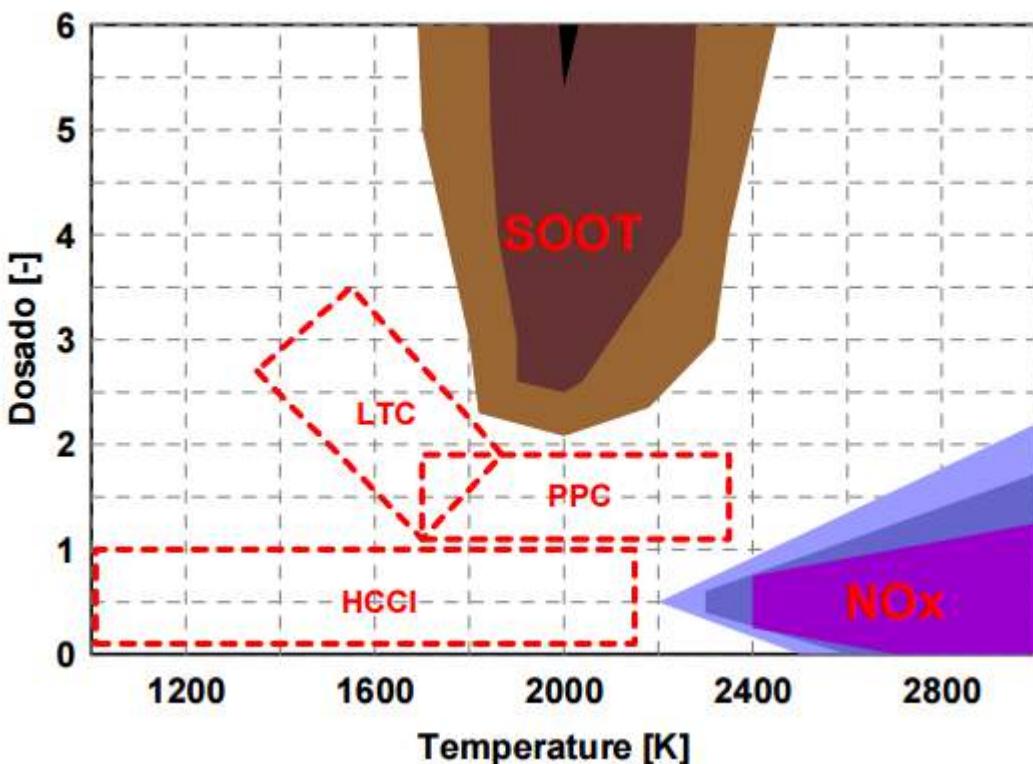


Figura 6-2: Estrategias de combustión para lograr bajas emisiones de NOx en el diagrama temperatura – dosado.

(Monin, 2009)

Además de mecanismos para reducir las emisiones de NOx, hay que prestar atención al consumo de aceite; ya que, además de emitirse componentes de sus aditivos en la combustión, contribuye a la formación de partículas de hollín, en concreto de la fracción orgánica soluble de las mismas.

El EGR descrito en el capítulo anterior se utiliza tanto en MEP como en MEC, sobre todo de inyección directa.

En el caso de los MEC, además, hay estudios en los que se plantea el funcionamiento combinado del EGR con una inyección de hidrógeno, con la finalidad de compensar las pérdidas de potencia inducidas por este sistema a la vez que se reducen las emisiones de NOx en el escape de forma significativa. El elevado índice de inflamabilidad del hidrógeno permite elevar el límite de la tasa de EGR desde el 15-30% en motores convencionales hasta un 50% con inyección de este gas. Hay estudios en los que se ha comprobado que añadiendo una pequeña cantidad de hidrógeno (aprox. 1% en vol.) se reducen las emisiones de COVs en más del 5%, gracias al incremento en la tasa de EGR y la estabilización de la combustión. (Banerjee, Roy, & Bose, 2015)

Además de las medidas anteriores, la forma en la que el conductor opera el motor de su vehículo influye en la formación de gases y partículas contaminantes. Asimismo, existen otros sistemas destinados a reducir consumo y emisiones, aplicables tanto en gasolina como Diesel, enfocados a la conducción eficiente, como los que aparecen a continuación:

- Recuperación de la energía de frenado: en vehículos híbridos y eléctricos, permiten reducir el consumo y emisiones.
- Asistentes para semáforos: permiten predecir el estado de los semáforos para evitar la parada en los mismos actuando sobre la velocidad del vehículo.
- Asistentes para el cambio de marchas: informan al conductor sobre el momento óptimo de subir o bajar de marcha.

Hay un modo de funcionamiento durante el cual los motores consumen combustible y emiten gases contaminantes sin recorrer distancia alguna, por lo que, al ir expresados en g/km o 1/100km, ambos factores (de emisión y consumo) toman valores infinitos. Esto ocurre durante el funcionamiento a ralentí. Por ello, hay multitud de sistemas destinados a minimizar el tiempo durante el cual los motores funcionan en este modo: sistemas de arranque y parada, generadores auxiliares, calentadores de combustión directa, sistemas de almacenamiento térmico, recuperadores de energía o tomas de corriente en áreas de descanso, aparcamientos, etc. Hay que tener en cuenta que con algunos de estos sistemas, al igual que ocurre con los vehículos eléctricos, las emisiones del motor de combustión interna no se evitan, sino que se trasladan a otro punto, generalmente a las centrales de suministro de la red eléctrica.

La mayoría de estos sistemas, excluyendo el primero, están orientados a camiones de gran tonelaje. Estos vehículos, por lo general, suelen tener sistemas auxiliares, como el calentamiento del motor, aire acondicionado, calefacción, etc. que se abastecen con el motor principal, y con los sistemas anteriormente mencionados se pretende reducir el tiempo que éste funciona a ralentí exclusivamente para dicho abastecimiento energético. Se han llevado a cabo estudios con el objetivo de cuantificar las emisiones de multitud de vehículos funcionando a ralentí. A continuación, en la tabla 6-1 se muestran los valores de dichas emisiones para una gran variedad de vehículos, gasolina y Diesel, e incluso motocicletas. En la tabla 6-2 se muestra la misma información para vehículos Diesel de gran tonelaje.

Tabla 6-1: Tasas de emisión en término medio para distintos tipos de vehículos a ralentí.

Pollutant	Units	LDGV <sup>a</sup>	LDGT <sup>b</sup>	HDGV <sup>c</sup>	LDDV <sup>d</sup>	LDDT <sup>e</sup>	HDDV <sup>f</sup>	MC <sup>g</sup>
VOC	g/h	2.683	4.043	6.495	1.373	2.720	3.455	19.153
	g/min	0.045	0.067	0.108	0.023	0.045	0.058	0.319
THC	g/h	3.163	4.838	7.260	1.353	2.680	3.503	21.115
	g/min	0.053	0.081	0.121	0.023	0.045	0.058	0.352
CO	g/h	71.225	72.725	151.900	7.018	5.853	25.628	301.075
	g/min	1.187	1.212	2.532	0.117	0.098	0.427	5.018
NO <sub>x</sub>	g/h	3.515	4.065	5.330	2.690	3.705	33.763	1.625
	g/min	0.059	0.068	0.089	0.045	0.062	0.563	0.027
PM <sub>2.5</sub>	g/h	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.100	N/A
	g/min	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.018	N/A
PM <sub>10</sub>	g/h	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.196	N/A
	g/min	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.020	N/A

<sup>a</sup> LDGV: Light-duty gasoline-fueled vehicles, up to gross vehicle weight (GVW) 6000 lb (e.g. gasoline-fueled passenger cars).

<sup>b</sup> LDGT: Light-duty gasoline-fueled trucks, up to GVW 8500 lb (e.g. pick-up trucks, minivans, passenger vans, sport-utility vehicles, etc.).

<sup>c</sup> HDGV: Heavy-duty gasoline-fueled vehicles, over GVW 8500 lb (e.g. gasoline-fueled heavy-trucks).

<sup>d</sup> LDDV: Light-duty diesel vehicles, up to GVW 6000 lb (e.g. diesel engine passenger cars).

<sup>e</sup> LDDT: Light-duty diesel trucks, up to GVW 8500 lb (e.g. diesel engine light-duty trucks).

<sup>f</sup> HDDV: Heavy-duty diesel vehicles, over GVW 8500 lb (e.g. diesel engine heavy-duty trucks).

<sup>g</sup> MC: Motorcycles (gasoline-fueled, certified for highway use).

Fuente: (Shancita, Masjuki, Kalam, Rizwanul Fattah, Rashed, & Rashedul, 2014)

Tabla 6-2: Tasas de emisión a ralentí en término medio para distintos tipos de vehículos pesados Diesel según categoría GVW (Gross Vehicle Weight).

Pollutant	Units	IIb <sup>b</sup>	III <sup>i</sup>	IV <sup>j</sup>	V <sup>k</sup>	VI <sup>l</sup>	VII <sup>m</sup>	VIIIa <sup>n</sup>	VIIIb <sup>o</sup>
VOC	g/h	1.465	1.555	2.025	2.120	2.820	3.503	3.518	4.218
	g/min	0.024	0.026	0.034	0.035	0.047	0.058	0.059	0.070
THC	g/h	1.498	1.580	2.055	2.150	2.865	3.553	3.565	4.270
	g/min	0.025	0.026	0.034	0.036	0.048	0.059	0.059	0.071
CO	g/h	9.305	10.068	12.898	13.183	15.163	19.055	26.548	34.473
	g/min	0.155	0.168	0.215	0.220	0.253	0.318	0.442	0.575
NO <sub>x</sub>	g/h	12.668	13.530	17.850	18.655	24.325	30.343	35.758	42.345
	g/min	0.211	0.226	0.298	0.311	0.405	0.506	0.596	0.706
PM <sub>2.5</sub>	g/h	1.103	1.010	1.065	1.008	1.069	1.093	1.070	1.114
	g/min	0.018	0.017	0.018	0.017	0.018	0.018	0.018	0.019
PM <sub>10</sub>	g/h	1.199	1.098	1.157	1.095	1.162	1.188	1.163	1.211
	g/min	0.020	0.018	0.019	0.018	0.019	0.020	0.019	0.020

<sup>b</sup> IIb: 8501–10,000 lb (e.g., full-size pick-up trucks, very large passenger vans).

<sup>i</sup> III: 10,001–14,000 lb (e.g., panel trucks, small enclosed delivery trucks).

<sup>j</sup> IV: 14,001–16,000 lb (e.g., city delivery trucks, landscape utility trucks).

<sup>k</sup> V: 16,001–19,500 lb (e.g., bucket utility trucks, large walk-in delivery trucks).

<sup>l</sup> VI: 19,501–26,000 lb (e.g., rack trucks, single axle vans).

<sup>m</sup> VII: 26,001–33,000 lb (e.g., tow trucks, garbage collection trucks).

<sup>n</sup> VIIIa: 33,001–60,000 lb (e.g., long-haul semi-tractor trailer rigs).

<sup>o</sup> VIIIb: >60,000 lb (e.g., long-haul semi-tractor trailer rigs).

Fuente: (Shancita, Masjuki, Kalam, Rizwanul Fattah, Rashed, & Rashedul, 2014)

## 6.2 Soluciones pasivas

Una vez formados los gases contaminantes, se pueden transformar en gases inocuos mediante sistemas postratamiento. Asimismo, existen filtros para retener las partículas que se generan durante la combustión.

El catalizador de oxidación es el que mejor funciona en motores Diesel, ya que los gases de escape contienen oxígeno de sobra para oxidar el CO y los HC, aunque no influye en las emisiones de NO<sub>x</sub>.

Para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> en motores que operan con mezcla pobre, además de la reducción catalítica selectiva, pueden usarse filtros químicos, también denominados trampas de NO<sub>x</sub> o catalizadores de acumulación de NO<sub>x</sub>, que los acumulan durante la operación del motor con mezcla pobre y se regeneran durante breves momentos de operación del motor con mezcla rica.

Para reducir las partículas se suelen instalar filtros de partículas, denominados DPF (Diesel Particulate Filter) debido a las exigentes normativas en cuanto a emisiones de este tipo. Además, en algunos casos, se aditanan los propios filtros para conseguir mayor rendimiento o eliminar algún gas contaminante además de partículas.

En la mayoría de vehículos Diesel se usan catalizadores de oxidación y filtros de partículas. Sin embargo, el dispositivo de reducción de NO<sub>x</sub> varía en función del vehículo. Por ejemplo, en el caso de los camiones y vehículos pesados, lo más frecuente es instalar sistemas de reducción catalítica selectiva. En la figura 6-3 se representa un esquema con los sistemas postratamiento usados en camiones.

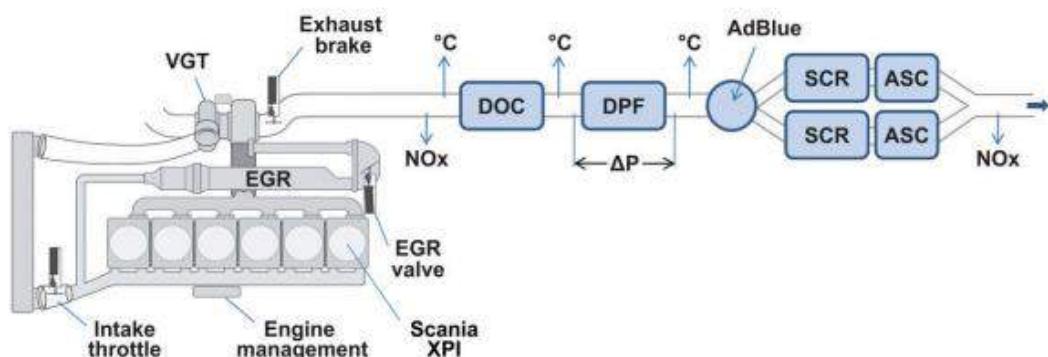


Figura 6-3: Vista esquemática del sistema de gestión del motor y los gases de escape

Fuente:

[http://www.scania.es/Images/P11301ES%20Euro%206%20engines%20ready%20for%20the%20market\\_tcm](http://www.scania.es/Images/P11301ES%20Euro%206%20engines%20ready%20for%20the%20market_tcm)

### [64\\_240654.pdf](#)

Además de los sistemas mencionados, los camiones suelen incorporar sistemas activos de reducción de emisiones, como el EGR y el turbocompresor de geometría variable.

En turismos, hay más variedad de sistemas. Por un lado, los turismos de mayor tamaño incorporan sistemas similares a los de los camiones, aunque de menor tamaño y capacidad. El llenado de los depósitos de AdBlue, por ejemplo, en los turismos es posible que se lleve a cabo en las revisiones dado su reducido consumo, mientras que en los camiones, la tendencia es a que el conductor los rellene en las estaciones de servicio dotadas de estos equipos cada cierto tiempo, puesto que recorren muchos más kilómetros. En la figura 6-4 se muestran los distintos sistemas postratamiento usados en turismos de este tipo:

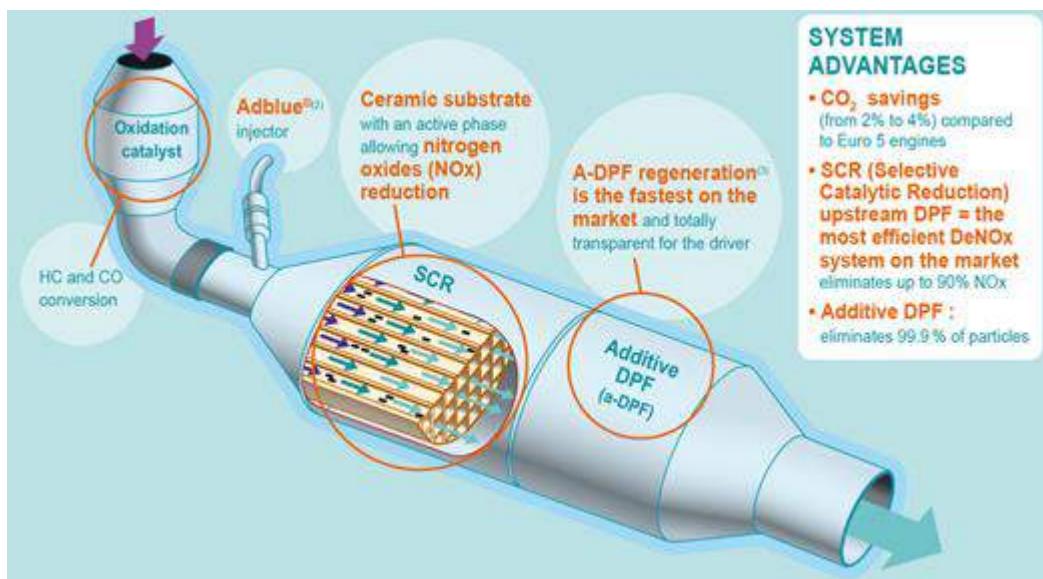


Figura 6-4: Línea de escape de un turismo equipado con filtro de partículas y catalizadores de oxidación y SCR.

Fuente: <http://www.psa-peugeot-citroen.com/en/featured-content/diesel-technology/scr-selective-catalytic-reduction>

En otros vehículos de menor tamaño, no es viable la instalación de sistemas de reducción catalítica selectiva, ya que, en términos relativos, ocupan mucho más espacio y suponen un incremento de peso importante. En ese caso, sigue siendo viable la instalación de trampas de NOx.

Un caso especial es el de los motores skyactiv de Mazda, que cumplen los límites de emisiones de NOx establecidos en la normativa Euro 6 sin necesidad de sistema postratamiento para reducir estos contaminantes. Esto se consigue gracias a la reducción de la relación de compresión. Estos motores operan con la relación de compresión más baja del mercado en motores Diesel: 14.0:1; por lo que no se dan en el interior de los cilindros temperaturas tan elevadas como en el resto de vehículos Diesel, y se reduce en gran medida la formación de óxidos de nitrógeno, haciendo innecesaria su posterior reducción.

La efectividad de los sistemas postratamiento explicados se ha ensayado en numerosas ocasiones. En dichos ensayos, se han cuantificado reducciones en las emisiones de CO e HC totales de aproximadamente dos órdenes de magnitud gracias a los catalizadores de oxidación y los filtros de partículas. Asimismo, las emisiones de NOx se redujeron en un 80% mediante sistemas de reducción catalítica selectiva. (May, Nguyen, Presto, & Gordon, 2014).



## 7 DESARROLLO FUTURO

---

Puesto que los avances tecnológicos están encaminados a cumplir con los nuevos estándares, cada vez más restrictivos, sería conveniente conocer la tendencia prevista en la normativa para comprender la razón de ser de dichos avances.

Por otra parte, se producen también avances con el objetivo de optimizar el funcionamiento de sistemas ya existentes para que, además de cumplir una normativa determinada, afecten lo mínimo posible al funcionamiento de los motores, o se abaratén sus costes de producción.

Por último, otro factor importante para predecir las tendencias en sistemas postratamiento es conocer las tendencias en los motores; ya que estos sistemas están muy condicionados con la composición de los gases de escape, que puede variar en función del tipo de motor, régimen de funcionamiento del mismo y demás sistemas colocados aguas arriba.

En el caso de los motores, la tendencia prevista en automóviles ligeros es hacia motores sobrealimentados, más pequeños y de gasolina. La última novedad en el mercado actual es el motor tricilíndrico de gasolina, con el que se pretende conseguir un consumo reducido sin comprometer la potencia incorporando un turbo o un compresor. Sin embargo, esta tecnología no está aún muy extendida, y se prevé un importante desarrollo de la misma en los próximos años, al igual que ocurrió con los Diesel en sus comienzos. Un caso particular es el 1.0 TSI tricilíndrico presentado por Volkswagen en el “36<sup>th</sup> International Vienna Motor Symposium”, que brinda una potencia de 272 CV gracias a la conjunción del motor descrito y un turbo eléctrico.

Por tanto, se prevé que los avances tengan lugar en motores de gasolina de inyección directa sobrealimentados. Además, es innegable que la electrónica juega un papel esencial, tanto en la inyección como en multitud de sistemas auxiliares de los motores; y sus avances están a la orden del día.

En cuanto a propulsión, los motores híbridos están abriendo una gran brecha en el mercado del automóvil, tanto en vehículos ligeros como pesados pero no difieren demasiado en cuanto al control de emisiones respecto de un vehículo tradicional.

Otro factor el uso de biocombustibles (biodiesel, bioetanol...), combustibles gaseosos o la aditivación y mezcla de combustibles tradicionales. En este caso, el combustible sí que afecta al sistema de postratamiento. Un caso peculiar, aunque no se espera que entre en el mercado a corto plazo es el del hidrógeno puro como combustible de los MCIA. En dicha combustión, en teoría, se libera agua como único residuo, aunque también pueden generarse NOx si se alcanzan temperaturas elevadas en algún punto del ciclo, debido al nitrógeno presente en el aire de admisión.

Por todo ello, los sistemas de catalización y filtrado de gases de escape tenderán a funcionar en motores de gasolina.

Uno de los avances en materia de catalizadores, que se encuentra aún en fase de desarrollo, consiste en un catalizador de cuatro vías para vehículos de gasolina presentado por la compañía BASF. El sistema combina en el mismo dispositivo un catalizador de tres vías con un filtro de partículas. Su estructura interna consiste en un monolito similar al de un catalizador convencional, pero con los canales bloqueados alternativamente, como en un filtro de partículas. Como consecuencia, se consigue el mismo efecto que con los sistemas convencionales, pero en un espacio más reducido. Por otra parte, las paredes interiores porosas del monolito están cubiertas directamente por el material activado catalíticamente, por lo que se ejerce sólo una ligera contrapresión sobre los gases de escape, afectando lo mínimo al funcionamiento del motor. En la figura 7-1 se muestra un esquema con el principio de funcionamiento de esta tecnología:

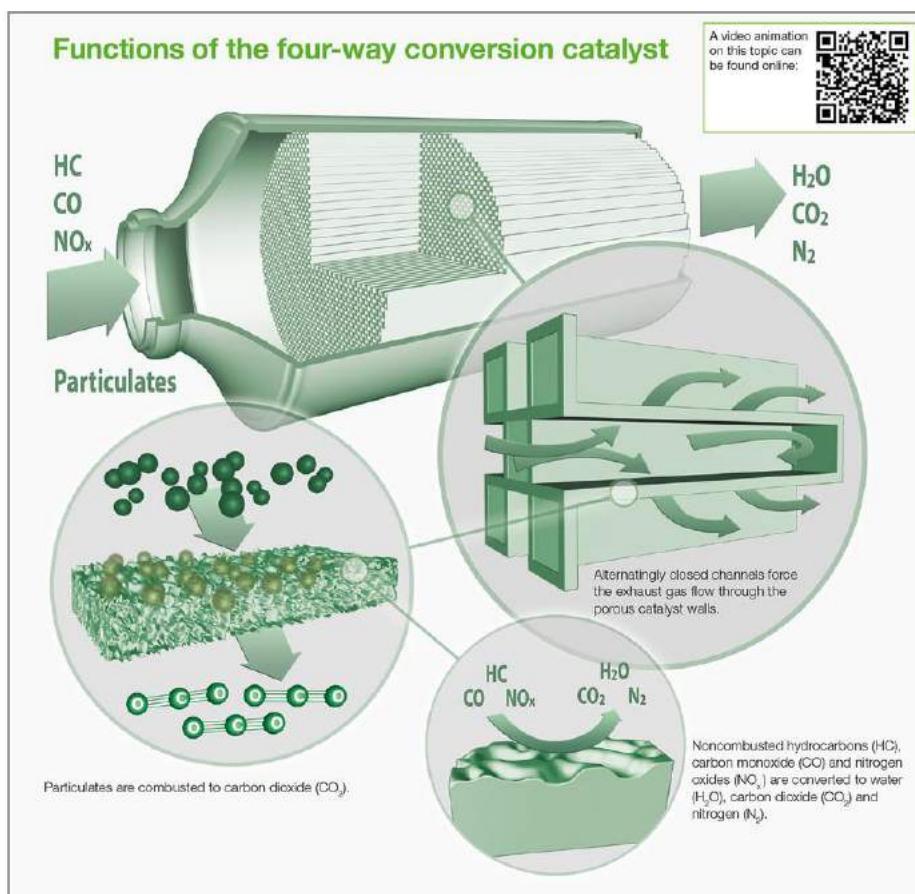


Figura 7-1: Esquema de funcionamiento del catalizador de cuatro vías.

Fuente: <https://www.bASF.com/en/company/news-and-media/science-around-us/catalytic-converter.html>

La problemática del artilugio anteriormente descrito reside en su utilidad, ya que, al incorporar un catalizador de tres vías, está ideado para funcionar en MECH de inyección indirecta y mezcla estequiométrica, cuyas emisiones de partículas son mucho menores que las de los motores de inyección directa.

Las normativas actuales establecen unos límites de emisiones contaminantes mucho menores que en sus primeras versiones. Por tanto, no parece muy razonable seguir en la misma tendencia, ya que la reducción de dichos límites es cada vez más costosa y menos relevante. En cambio, debido a la disparidad existente entre los niveles de contaminante permitidos para la homologación de vehículos y los emitidos durante la conducción real de los mismos, parece lógico pensar que la normativa tenderá a establecer unos ciclos de ensayo que se asemejen más a la conducción real de los vehículos, a controlar la durabilidad de los sistemas postratamiento y a limitar las emisiones a baja temperatura. Lo ideal, en cuanto a normativa, sería homogeneizar en un futuro los estándares de emisiones en todo el mundo.



## 8 CONCLUSIONES

**E**n el ámbito de las emisiones contaminantes de los vehículos, hay varias etapas. En un principio, se dispararon debido a los elevados niveles emitidos por los vehículos, aunque éstos no eran muy numerosos. Fue entonces cuando se inició la normativa para controlarlas en los países más afectados, que también eran los más desarrollados. Con el paso del tiempo, ha pasado a ser un problema cuantitativo: las emisiones de los vehículos modernos son ínfimas en comparación con aquellas de los vehículos más antiguos, y los sistemas postratamiento funcionan con rendimientos bastante aceptables. El problema es la cantidad de vehículos que se aglomeran, sobre todo, en las grandes ciudades.

En cuanto a la reducción de emisiones propiamente dicha, habría que diferenciar tres grupos: motores de encendido provocado de inyección indirecta, ídem de inyección indirecta y motores de encendido por compresión.

En el primer grupo, la tecnología actual cumple con su función sin mucha dificultad. Los catalizadores de tres vías tienen rendimientos bastante altos, en parte gracias al desarrollo de la electrónica en los sistemas de control e inyección de la mezcla y, por otra parte, no se producen elevados niveles de partículas. Por todo ello, las emisiones de este tipo de motores durante su funcionamiento cotidiano suelen ser similares a las que marca la normativa para su homologación.

En el caso de los motores de gasolina de inyección directa, las emisiones son menores. La problemática reside en la dificultad para reducir las emisiones de NOx en presencia de oxígeno. Para ello, por una parte, se evita la formación de los mismos mediante soluciones activas, como el diseño correcto de inyectores, distribución y cámara de combustión entre otros parámetros e incluyendo sistemas de recirculación de gases de escape. Por otra parte, para evitar la emisión de los mismos, se suelen emplear filtros químicos, también llamados trampas de NOx. En cuanto a las emisiones de partículas, son mayores que en el caso anterior. Por consiguiente, están también limitadas sus emisiones en Europa desde la entrada en vigor de la Euro 5, y los vehículos empiezan a usar filtros de partículas.

Por último, el funcionamiento de los vehículos Diesel en cuanto a emisiones es similar al caso de inyección directa de gasolina (GDI), por lo que las soluciones activas y pasivas son muy parecidas en ambos tipos de motores, destacando únicamente el uso cada vez más extendido de los sistemas de reducción catalítica selectiva. Entre los mecanismos de inyección estudiados como soluciones activas para este caso concreto, destacan la combustión con carga homogénea (HCCI), la combustión parcialmente premezclada (PPC) y la combustión a baja temperatura (LTC), todas destinadas a la reducción de la temperatura durante la combustión. Este tipo de motores es el más contaminante y peligroso en cuanto a la emisión de partículas, ya que, además de emitirlas en grandes cantidades, las partículas emitidas son muy finas y, por tanto, perjudiciales para los seres vivos.

Por sus mayores dificultades para controlar las emisiones, el comportamiento de los motores Diesel durante su vida útil difiere bastante al mismo durante los ciclos de ensayo para su homologación de emisiones. Por tanto, es necesario un cambio en la normativa en este aspecto y un control más exhaustivo del cumplimiento de los límites de emisión durante los años de funcionamiento de los vehículos.

Por último, en rasgos generales, cabría mencionar que la contaminación es un problema global y que, por tanto, exige soluciones globales. No tiene sentido seguir endureciendo la normativa en algunos países si en otras zonas del planeta no se sigue la misma estrategia.



## REFERENCIAS

- Alonso Pérez, S. (2007). Caracterización de las intrusiones de polvo africano en Canarias . *Universidad de La Laguna, Tenerife* .
- Álvarez Flórez, J. A. (2005). *Motores alternativos de combustión interna*. Barcelona: Edicions UPC.
- Banerjee, R., Roy, S., & Bose, P. (2015). Hydrogen-EGR synergy as a promising pathway to meet the PM-NOx-BSFC trade-off contingencies of the diesel engine: A comprehensive review. *international journal of hydrogen energy*, 12824 - 12847.
- Bosch, R. (2005). *Manual de la técnica del automóvil*. Plochingen: Reverte.
- Carslaw, D., & Carslaw, G. (2013). New insights from comprehensive on-road measurements of NOx, NO2 and NH3 from vehicle emission remote sensing in London, UK. *Atmospheric Environment*, 339 - 347.
- Chen, Y., & Borken-Kleefeld, J. (2014). Real-driving emissions from cars and light commercial vehicles - Results from 13 years remote sensing at Zurich/CH. *Atmospheric Environment*, 157 - 164.
- Hawley, J. G., Brace, C. J., & Wallace, F. J. (1998). Combustion-Related Emissions in CI Engines. En *Handbook of Air Pollution From Internal Combustion Engines* (pág. 314). Academic Press.
- May, A., Nguyen, N., Presto, A., & Gordon, T. (2014). Gas- and particle-phase primary emissions from in-use, on-road gasoline and diesel vehicles. *Atmospheric Environment*, 247 - 260.
- Monin, C. (2009). Caracterización del Proceso de Formación de Hollín en una Llama de Difusión Diesel de Baja Temperatura. *Universidad Politécnica de Valencia*.
- Payri, F., & Desantes, J. M. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Reverté.
- Shancita, I., Masjuki, H., Kalam, M., Rizwanul Fattah, I., Rashed, M., & Rashedul, H. (2014). A review on idling reduction strategies to improve fuel economy and reduce exhaust emissions of transport vehicles. *Energy Conversion and Management*, 794 - 807.
- Stone, R. (1992). *Introduction to internal combustion engines*. Hounds mills, Basingstoke, Hampshire: The Macmillan Press Ltd.
- Überall , A., Otte, R., Eilts, P., & Krahl, J. (2015). A literature research about particle emissions from engines with direct gasoline injection and the potential to reduce these emissions. *Fuel*, 203-207.
- Uriarte Cantolla, A. (2009). *Historia del clima de la tierra*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.

## ENLACES WEB VISITADOS

---

[http://digital.csic.es/bitstream/10261/27476/2/Viana\\_Rodriguez\\_2.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/27476/2/Viana_Rodriguez_2.pdf)  
<http://biblioteca.iapg.org.ar/ArchivosAdjuntos/Petrotecnia/2003-5/Calidad.pdf>  
<http://epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/n2o.html#Reducing>  
[http://gestiona.madrid.org/azul\\_internet/html/web/5.htm?ESTADO\\_MENU=5](http://gestiona.madrid.org/azul_internet/html/web/5.htm?ESTADO_MENU=5)  
<http://www.jems.com/>  
<https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=586&conID=621>  
[http://e-auto.com.mx/manual\\_detalle.php?manual\\_id=244](http://e-auto.com.mx/manual_detalle.php?manual_id=244)  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=uriserv:l28077>  
[http://www.navarra.es/home\\_es/Temas/Medio+Ambiente/Calidad+del+aire/Informacion/Efectos+globales/ozono+y+smog.htm](http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Calidad+del+aire/Informacion/Efectos+globales/ozono+y+smog.htm)  
<http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/10CAtm1/362OzonCarac.htm>  
<http://www.abc.es/ciencia/20150526/abci-capas-ozono-201505261425.html>  
[http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Publicaciones/Cuadernos/4%202011/Calidad\\_del\\_aire\\_urbano\\_salud\\_y\\_trafico\\_rodado.pdf](http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Publicaciones/Cuadernos/4%202011/Calidad_del_aire_urbano_salud_y_trafico_rodado.pdf)  
[http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:42012X0215\(01\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:42012X0215(01))  
<http://espanol.lubrizol.com/EngineOilAdditives/ACEA/ReferenceMaterial/EuropeanUnionEmissionsStandards.html>  
[http://sociedad.elpais.com/sociedad/2013/03/29/actualidad/1364573219\\_475007.html](http://sociedad.elpais.com/sociedad/2013/03/29/actualidad/1364573219_475007.html)  
<http://www.motorpasionfuturo.com/medio-ambiente/japon-y-su-historica-alergia-hacia-el-motor-diesel>  
[http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/mlegal/aire/res61\\_99\\_anx1.pdf](http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/mlegal/aire/res61_99_anx1.pdf)  
[http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/mlegal/aire/res61\\_99\\_anx1.pdf](http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/mlegal/aire/res61_99_anx1.pdf)  
<http://www.vidasostenible.org/informes/historia-de-las-tecnologias-de-reduccion-de-emisiones-contaminantes-en-vehiculos/>  
[http://www.eurokat.de/english/katinfos/katinfos\\_edelmetallimkat.html](http://www.eurokat.de/english/katinfos/katinfos_edelmetallimkat.html)  
[https://www.dieselnet.com/tech/cat\\_substrate.php](https://www.dieselnet.com/tech/cat_substrate.php)  
[http://www.ccj-online.com/2q\\_2012-outage-handbook/scr-performance-management/](http://www.ccj-online.com/2q_2012-outage-handbook/scr-performance-management/)  
<https://www.bASF.com/en/company/news-and-media/science-around-us/catalytic-converter.html>  
[https://www.dieselnet.com/tech/cat\\_scr\\_mobile.php](https://www.dieselnet.com/tech/cat_scr_mobile.php)  
<http://es.findadblue.com/adblue/scr/>  
<http://www.autoevolution.com/news/how-the-diesel-particulate-filter-works-90866.html>  
<http://ect.jmcatalysts.com/emission-control-technologies>  
<http://revistamotor.eu/index.php/de-calle/mecanica/198-tendencias-de-reduccion-de-consumo-en-motores-de->

gasolina

- [http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Publicaciones/Cuadernos/4%202011/Calidad\\_del\\_aire\\_urbano\\_salud\\_y\\_trafico\\_rodado.pdf](http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Publicaciones/Cuadernos/4%202011/Calidad_del_aire_urbano_salud_y_trafico_rodado.pdf)
- <http://www.motorpasion.com/ford/motor-ford-ecoboost-1-0-con-desconexion-de-cilindros>
- <http://www.autobild.es/pruebas/test-100000-km-ford-focus-ecoboost-tambien-con-tres-243285>
- <http://www.motorpasion.com/tecnologia/asi-funcionan-los-motores-tsi>
- <http://www.autopista.es/noticias-motor/articulo/mot15186.htm>
- [http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Publicaciones/Cuadernos/4%202011/Calidad\\_del\\_aire\\_urbano\\_salud\\_y\\_trafico\\_rodado.pdf](http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Publicaciones/Cuadernos/4%202011/Calidad_del_aire_urbano_salud_y_trafico_rodado.pdf)
- <http://www.diariomotor.com/tecmovia/2015/07/31/asistentes-para-semaforos/>
- <http://www.infotaller.tv/electromecanica/actualidad/para-bosch-los-vehiculos-pueden-reducir-las-emisiones-mas-aun>
- <http://www.peugeot.es/tecnologias-innovacion/p=tecnologia-eficiencia/>
- [http://techcenter.mercedes-benz.com/es\\_ES/bluetec/detail.html](http://techcenter.mercedes-benz.com/es_ES/bluetec/detail.html)
- <http://www.motor3punto0.com/motores-tricilindricos/>
- <http://www.diariomotor.com/2015/05/11/volkswagen-1-litro-turbo-272-cv/>
- [https://www.volkswagen-media-services.com/en/detailpage/-/detail/Volkswagen-at-the-36th-International-Vienna-Motor-Symposium/view/2262369/7a5bbec13158edd433c6630f5ac445da?p\\_p\\_auth=A1EthY0P](https://www.volkswagen-media-services.com/en/detailpage/-/detail/Volkswagen-at-the-36th-International-Vienna-Motor-Symposium/view/2262369/7a5bbec13158edd433c6630f5ac445da?p_p_auth=A1EthY0P)
- <https://www.bASF.com/en/company/news-and-media/science-around-us/catalytic-converter.html>
- <http://www.motoradiesel.com.mx/noticias/international/304-historia-de-un-motor-en-particular-el-diesel.html>
- <http://www.historiasiglo20.org/GLOS/crisispetroleo.htm>
- [http://www.k-wz.de/vmotor/v\\_omotors.html](http://www.k-wz.de/vmotor/v_omotors.html)
- [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/tackling\\_climate\\_change/l28060\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/l28060_es.htm)
- [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/air\\_pollution/l28186\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/l28186_es.htm)
- [http://gestiona.madrid.org/azul\\_internet/html/web/5.htm?ESTADO\\_MENU=5](http://gestiona.madrid.org/azul_internet/html/web/5.htm?ESTADO_MENU=5)
- [https://www.navarra.es/home\\_es/Temas/Medio+Ambiente/Calidad+del+aire/Informacion/Contaminantes/hidrocarburos.htm](https://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Calidad+del+aire/Informacion/Contaminantes/hidrocarburos.htm)
- <http://es.slideshare.net/gonguibri/info-catalizador-7245066>
- <http://www.autonucion.com/ocio-tu-catalizador-puede-estar-en-peligro-los-robos-se-han-multiplicado-con-la-crisis/#close>
- <http://noticias.coches.com/consejos/que-es-adblue/174942>
- <http://www.aficionadosalamecanica.net/sonda-lambda.htm>
- <http://www.emitec.com/en/technology/product-applications/nox-adsorber/>
- [http://www.scania.es/Images/P11301ES%20Euro%206%20engines%20ready%20for%20the%20market\\_tcm64-240654.pdf](http://www.scania.es/Images/P11301ES%20Euro%206%20engines%20ready%20for%20the%20market_tcm64-240654.pdf)
- <http://www.psa-peugeot-citroen.com/en/featured-content/diesel-technology/scr-selective-catalytic-reduction>

