



Estudio sobre la utilización de sistemas SCR (Selective Catalytic Reduction) en locomotoras diésel

TRABAJO FINAL DEL MÁSTER EN SISTEMAS FERROVIARIOS
2016/2017

Autora: Raquel Biurrún Rodríguez-Bobito

Director: Gabriel Morales Sánchez

Co-Director: Eugenio Anubla Lucía

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS FERROVIARIOS

2016-2017

TÍTULO DEL TRABAJO:

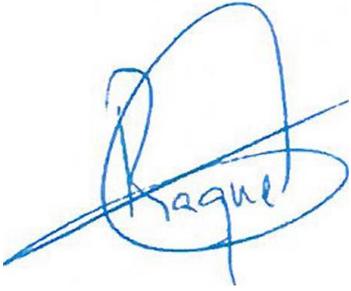
Estudio sobre la utilización de sistemas SCR (Selective Catalytic Reduction) en locomotoras diésel

AUTORA:

Raquel Biurrun Rodríguez-Bobito

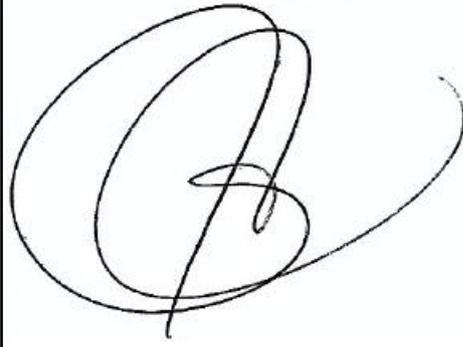
DIRECTOR:

Gabriel Morales Sánchez



Co-Director:

Eugenio Anubla Lucía



RESUMEN:

Este trabajo fin de máster pretende analizar las distintas tecnologías existentes actualmente en el sector del transporte y que pueden ser aplicados en un futuro de manera generalizada a todas las locomotoras diésel.

Para ello, se analiza en primer lugar cuántas locomotoras diésel hay en el mundo, viendo que gran parte de ellas recaen en países con normativas medioambientales que limitan las emisiones contaminantes y que se prevé que en un futuro, tengan que realizar algún tipo de actuación sobre ellas para poder cumplir con esos límites de emisión de contaminación cada vez más restrictivos.

Una vez identificada la problemática, se investiga qué contaminantes son los que realmente se producen tras la combustión en un motor diésel y qué perjuicios tienen en la salud de las personas y sobre el medio ambiente.

Se compara con otros sectores del transporte, similares en características a las locomotoras diésel, que desde hace tiempo adoptaron medidas para poder cumplir con los límites impuestos en las normativas y sobre cómo cada fabricante está apostando por una tecnología u otra, y que sería extrapolable al ferrocarril.

Por último, se propone cómo sería la implementación de la tecnología SCR en una locomotora diésel.

ÍNDICE

1	Descripción del trabajo	5
2	Objetivos del trabajo	5
3	Tareas	5
4	Planificación	6
5	DESARROLLO DEL TRABAJO	7
5.1	Evolución histórica de la locomotora diésel	7
5.2	Motor diésel	12
5.3	Normativa sobre las emisiones atmosféricas de motores diésel	15
5.3.1	NORMATIVA SOBRE EMISIONES DE VEHÍCULOS PESADOS	17
5.3.2	NORMATIVA SOBRE COMBUSTIBLES	18
5.3.3	PRINCIPALES CONTAMINANTES EN LOS GASES DE ESCAPE DEL MOTOR DIÉSEL	18
5.3.4	BENEFICIOS ESPERADOS DEL PROGRAMA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES	22
5.3.5	TECNOLOGÍAS EMPLEADAS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA Y REDUCCIÓN DE EMISIONES	22
5.3.6	FORMACIÓN DE PARTÍCULAS Y NO _x DURANTE LA COMBUSTIÓN	23
5.3.7	TECNOLOGÍAS EMPLEADAS PARA LA REDUCCIÓN DE PM Y NO _x	24
5.4	Medidas adoptadas en otros medios de transporte	26
5.5	Implementación de esta tecnología a un caso concreto	36
6	Conclusiones	39
7	Aportaciones	40

1 Descripción del trabajo

Con la entrada en vigor de las normativas europeas de control de emisiones a la atmósfera, los vehículos de nueva concepción han de cumplir con los nuevos límites de contaminación, teniendo que recurrir los fabricantes a la instalación de sistemas de post-tratamiento en el sistema de escape del vehículo.

En este trabajo fin de máster se pretende realizar un estudio sobre el uso de sistemas de control de emisiones de óxidos nitrógeno mediante tecnología SCR (Selective Catalytic Reduction) en las locomotoras diésel.

Una vez vistas todas las posibilidades que a día de hoy se comercializan e incluso se están investigando, se propondrán soluciones que se están adoptando en otras administraciones/países para las locomotoras que se encuentran ya en servicio.

2 Objetivos del trabajo

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de la problemática de la emisión de gases contaminantes a la atmósfera de las locomotoras diésel actuales, en especial partículas sólidas y óxidos de nitrógeno, y proponer medidas paliativas para su control. Para ello se evaluará la implantación de distintos sistemas, tales como los filtros de partículas y los sistemas SCR AdBlue®.

3 Tareas

Este trabajo se compone de las siguientes tareas:

- Familiarización y estudio del funcionamiento de una locomotora diésel y sus motores.
- Análisis de las emisiones contaminantes producidas tras la combustión del combustible diésel.
- Familiarización y estudio de las normativas medio ambientales actuales.
- Identificación de tecnologías con resultados positivos en cuanto a la disminución de los contaminantes más nocivos.
- Propuesta de soluciones para locomotoras que se encuentran ya en servicio.

4 Planificación

TAREA	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO
Búsqueda de tema y tutor								
Búsqueda de documentación y planificación de tareas a acometer								
Familiarización y estudio de las locomotoras diésel y sus motores								
Familiarización y estudio de las normativas medio ambientales actuales								
Análisis de las emisiones contaminantes producidas								
Identificación de tecnologías								
Clasificación de las propuestas y estructuración del trabajo fin de máster								
Defensa del trabajo fin de máster								

Estudio sobre la utilización de sistemas SCR (Selective Catalytic Reduction) en locomotoras diésel

5 DESARROLLO DEL TRABAJO

5.1 Evolución histórica de la locomotora diésel

El desarrollo de los sistemas de tracción es un índice inequívoco del progreso del ferrocarril. La locomotora diésel ha sido el elemento que, en numerosas ocasiones, ha permitido mantenerse en condiciones de superioridad frente a otros medios de transporte. La locomotora diésel tiene su historia jalonada por una sucesión de hechos que marcan su evolución y desarrollo. Para ello hay que remontarse a finales del pasado siglo, en donde el doctor-ingenero Diesel, inventor del motor que lleva su nombre, ya preconizó en 1890 la aplicación de este sistema productor de potencia a la tracción ferroviaria, no fue el primero en construir una locomotora accionada por motor térmico. Está aceptado como cierto que en 1891, es decir, un poco antes de que el primer motor diésel empezara a funcionar, hubo una pequeña máquina considerándose la primera locomotora accionada por un motor térmico, un motor Daimler de gasolina, rodó sobre carriles railes en Inglaterra. También en aquel país, en 1894, W. D. Priestman instaló un motor Priestman, que desarrollaba 30 CV, en una pequeña locomotora de dos ejes, alquilada por la Compañía del Ferrocarril del Noreste. Prestó servicio regular de maniobras sólo durante un corto período de tiempo, debido principalmente a su escasa potencia, muy inferior a la de las locomotoras de vapor contemporáneas dedicadas al mismo servicio. En el mismo año de 1894 la casa Maschinenfabrik Esslingen construyó también una locomotora de maniobras con un motor vertical Daimler, que tampoco duró mucho tiempo en servicio.

A pesar de estos primeros intentos, hasta el año 1912 no se inicia propiamente el constante desarrollo de la locomotora diésel. Es cuando aparece una, estudiada por Klose (funcionario de los FF.CC. prusianos) y construida conjuntamente por las casas Sulzer y Borsing, con destino a los FF.CC. del Estado de Prusia. Estaba equipada con un motor Sulzer de dos tiempos, con cilindros en «V», y podía alcanzar una velocidad de 100 km/h. Los cilindros atacaban directamente un falso eje acoplado por bielas a las ruedas motrices. Estas características constructivas repercutían en una notable falta de flexibilidad en cuanto al aprovechamiento de la fuerza del motor, por lo que no cabía esperar ningún éxito en la explotación normal. Después de haber realizado algunos viajes de pruebas en Suiza, pasó a efectuar ensayos en la línea de Berlín a Mansfeld. Los resultados obtenidos no fueron ciertamente halagadores, pero no por ello sus promotores, el doctor Diesel, Jacob Sulzer y Adolph Klose, desistieron en su empeño. Fue una valiosa fuente de experiencia que facilitó enormemente el camino que los hombres dedicados al desarrollo de este sistema de tracción debían recorrer antes de alcanzar éxitos positivos. Quedó asimismo demostrado que no era factible el accionamiento directo de los ejes, sino que se necesitaba de algún elemento intermedio para poder variar el par demasiado uniforme desarrollado por el motor Diesel.

Aquella imperfecta locomotora despertó el interés de Hermann Lemp, quien, a su regreso a los Estados Unidos, aplicó la transmisión eléctrica que ya se utilizaba en automotores y pequeñas locomotoras de gasolina, desarrollando un sistema de control en el que a día de hoy se basan casi todos los empleados en las locomotoras Diesel-eléctricas. Aproximadamente por la misma época, la casa inglesa Hawthorn-Leslie, habitual constructora de locomotoras de vapor, se interesó en la construcción de locomotoras diésel, ofreciendo en 1913 un modelo de 1.000 CV con transmisión eléctrica para el ferrocarril Trans-Australiano.

Durante la primera guerra mundial y como consecuencia de la misma, quedaron paralizadas en Europa las actividades experimentales, salvo en Suecia, donde la casa Deva llegó a construir furgones automotores de hasta 250 CV, que pueden considerarse precursores de locomotoras diésel-eléctricas posteriores. En los Estados Unidos, menos afectados por la guerra, se realizó la construcción de un grupo de locomotoras también diésel-eléctricas, de 200 CV, con las que General Electric inició sus actividades en este campo y para las cuales adoptó un motor Junkers de origen alemán. No hay muchos datos sobre los resultados obtenidos con este grupo de locomotoras, pero dado que el desarrollo posterior durante los años 1920 y 1924 poco tuvo que ver con aquellas primeras unidades es de suponer que no fueron muy satisfactorios.

En Europa, en el mismo periodo de la posguerra, después del escaso éxito alcanzado con la locomotora de accionamiento directo, la casa Sulzer se dedicó al desarrollo de la locomotora con transmisión eléctrica, empezando por un motor Diésel en «V», para luego seguir con motores de cilindros verticales en línea. En realidad, Sulzer, ya en 1920, fue el primer constructor que ofreció una gama normalizada de motores diésel, exclusivamente para su aplicación ferroviaria.

El primer paso decisivo en la construcción de locomotoras diésel fue dado en Alemania, cuando un jefe de la comisión de compras de material ferroviario, encargó a la Maschinenfabrik Esslingen una locomotora de 1.000 CV, con transmisión eléctrica y motor MAN, puesta en servicio en 1924 en los FF.CC. Soviéticos, prototipo de otras posteriores empleadas con éxito notable en las líneas del Turquestán y repetidas con diversas modificaciones por Krupp y por talleres rusos. En cambio, un ensayo efectuado con una locomotora con transmisión mecánica no dio los resultados deseados.

En aquella época los sistemas de transmisión experimentaban un constante desarrollo, especialmente aquellas que, básicamente, debían prevalecer a lo largo del tiempo: las eléctricas, las hidráulicas y las mecánicas. De todos los sistemas de transmisión hidráulica, la que al principio despertó el mayor interés fue la de Lentz, que llegó a instalarse en varios prototipos de locomotoras de maniobras, construidos en Alemania y Austria. En 1924 se instaló una transmisión del sistema Lauf-Thoma en una locomotora prototipo que, por cierto, estaba ya dotada de un equipo de radio como sistema de comunicación mientras efectuaba servicio de maniobras. De los numerosos

tipos de transmisión mecánica aparecidos por aquellas fechas, solamente unos pocos han llegado, básicamente, a nuestros días y únicamente se aplican a locomotoras de pequeña potencia.

En el desarrollo realizado por General Electric durante los años 1920 a 1924, encontró un sólido apoyo en la colaboración de Hermann Lemp, quien recibió el encargo de estudiar un motor que resultara adecuado para el servicio ferroviario e investigar sobre la eficacia de las transmisiones. De ahí surgió en 1926 una trascendental colaboración: la de «General Electric» con «Ingersoll Rand» y con «American Locomotive Company (ALCO)». Se había construido ya, en 1923, una primera locomotora diésel-eléctrica con dos bogies que después de haber hecho demostraciones en 14 ferrocarriles fue finalmente adquirida por el Central Railroad de New Jersey en 1925, donde prestó servicio regular hasta hace muy poco tiempo. La primera de las citadas empresas construía el equipo eléctrico, la segunda el motor diésel y la tercera la parte mecánica, colaboración con la que se inicia la dieselización, por el momento, en los servicios de maniobras de los ferrocarriles norteamericanos, llegándose ya entre las primeras 200 máquinas a potencias de hasta de 800 CV.

Paralelamente, la Electro-Motive Company, fundada en 1922 por L. H. Hamilton, después de suministrar un número considerable de coches automotores, primero con motores de gasolina y a partir de 1934 con Diésel, entra en el año siguiente, habiendo sido adquirida y respaldada por General Motors, en el mercado con la primera locomotora diésel de gran potencia en los Estados Unidos. Era una locomotora compuesta de dos unidades con una potencia total instalada de 3.600 CV, lo que permitía rivalizar con las locomotoras de vapor contemporáneas. Fue ésta el prototipo de las muchas que dicho constructor suministraría ya en serie a todos los países del mundo. Hay que destacar un importante acontecimiento: la construcción de los primeros motores diésel sobrealimentados para tracción ferroviaria, realizada por Krupp en 1930.

En los años de 1928 a 1930, la producción de locomotoras diésel en los Estados Unidos se limitó a unas 85 unidades, todas de maniobras, mientras durante el mismo período solamente en Alemania la producción fue de unas 2.000 máquinas. Pero también en Europa la producción estaba limitada, casi exclusivamente, a la locomotora de maniobras, con potencias raramente superiores a 150 CV.

En cuanto a España, las primeras locomotoras diésel para vía normal que tuvieron 100 CV fueron dos, suministradas en los años 1928-29, para las obras del puerto de Alicante, entonces en curso.

Evolución de la tracción diésel en España

Alrededor de los años treinta, las compañías sufren una crisis ferroviaria. Una solución para reducirla, fue sustituir los trenes que no resultaban económicos de vapor por otros de tracción diésel.

La Guerra Civil pospuso el desarrollo de la tracción diésel en España hasta los años cincuenta. De esta manera, es a partir de los años sesenta, a través del Plan de Modernización de RENFE cuando se sustituyen las locomotoras

de vapor por las locomotoras diésel. La dieselización se produjo a través de tres tipos de trenes: los tractores de maniobras, las locomotoras de línea y los trenes diésel de viajeros para servicios diurnos.

Funcionamiento de una locomotora diésel

Las locomotoras diésel tienen un motor de combustión interna que es el que genera el movimiento. Se usan motores diésel porque son los motores más adecuados para pesos más "pesados" como trenes, autobuses, camiones, barcos, grúas, excavadoras...

Los motores de combustión interna alternativos, se pueden clasificar según distintos criterios. La clasificación más importante es la que les divide en motores de encendido provocado y motores de encendido por compresión, es decir, una clasificación dependiendo de cómo se inicia y se desarrolla la combustión de la mezcla de aire y combustible en su interior. En los motores de encendido provocado o motores Otto, por el nombre de su inventor, la combustión se inicia por un agente externo, en general una chispa en la bujía, y luego se propaga por la cámara mediante un frente de llama. Dicha chispa se produce al final de la compresión, de forma que la combustión tiene lugar mientras el pistón se encuentra en las proximidades del punto muerto superior, desarrollándose la última parte del proceso durante la expansión, cuando el pistón está ya descendiendo.

El otro tipo de motor de combustión interna alternativo es el de encendido por compresión, en el que la combustión se inicia por autoinflamación de la mezcla y, por tanto, sin causa externa. Ello es debido, principalmente, a las características del combustible que utilizan estos motores y a las condiciones de presión y temperatura alcanzadas al final de la compresión, debido a las elevadas relaciones de compresión con las que se diseñan estos motores. A estos motores también se les denomina motores diésel, en este caso en recuerdo del inventor del ciclo. En los diésel se admite y comprime solamente aire, y es al final de la compresión cuando se comienza a inyectar el combustible con una determinada ley, de forma que transcurrido un cierto tiempo de retraso la mezcla se autoinflama. La ley de inyección define la cantidad de combustible que se inyecta en cada instante durante el período total de inyección.

La clasificación anterior es sin duda la más importante, pero los motores también se pueden clasificar en motores de dos tiempos y motores de cuatro tiempos. Los motores de cuatro tiempos emplean cuatro carreras del pistón para realizar un ciclo completo, de forma que, para los procesos de escape de los gases ya quemados y admisión de la mezcla, se emplea una revolución del cigüeñal. En un motor de dos tiempos todos los procesos: admisión, compresión, combustión, expansión y escape, tienen lugar durante dos carreras del pistón, o sea en una única vuelta del cigüeñal.

Para el caso que nos ocupa que son las locomotoras diésel, éstas utilizan como fuente de energía la producida por un motor de combustión interna de ciclo diésel. Estos motores pueden ser de dos o cuatro tiempos, pero se suelen

utilizar más los de dos tiempos. La transmisión de la potencia se realiza con transmisión mecánica convencional en pequeñas locomotoras de maniobra, dresinas, ferrobuses...

Hay locomotoras diésel que transportan vagones en los que pueden alcanzar los 250 km/h, velocidad nada desdeñable.

5.2 Motor diésel

Los requisitos energéticos han aumentado rápidamente en todo el mundo debido a la industrialización y los cambios de estilo de vida posterior. La mayor parte de esta energía se genera a partir de combustibles fósiles como el carbón, gas natural, gasolina y diésel. La fuente de casi el 90% de la energía actual se basa en la combustión de los combustibles fósiles y en los carburantes derivados del petróleo. En los últimos años, los efectos medioambientales de emisiones de contaminantes provenientes de fuentes de combustión están teniendo graves consecuencias en el calentamiento global.

Los motores diésel son ampliamente utilizados en muchas áreas como automóviles, locomotoras, motores marinos, generaciones de energía etc., debido a su alta potencia y eficiencia térmica. A pesar de que los motores diésel dan más beneficios, los efectos perjudiciales para la salud de las personas debido a la emisión de contaminantes de estos motores tienen que ser considerados. Las principales emisiones contaminantes de estos motores diésel son los óxidos de nitrógeno (NO_x) y materia de partículas (PM), junto con otros contaminantes como son el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono (CO_2), los hidrocarburos (HC) y los óxidos de azufre (SO_x).

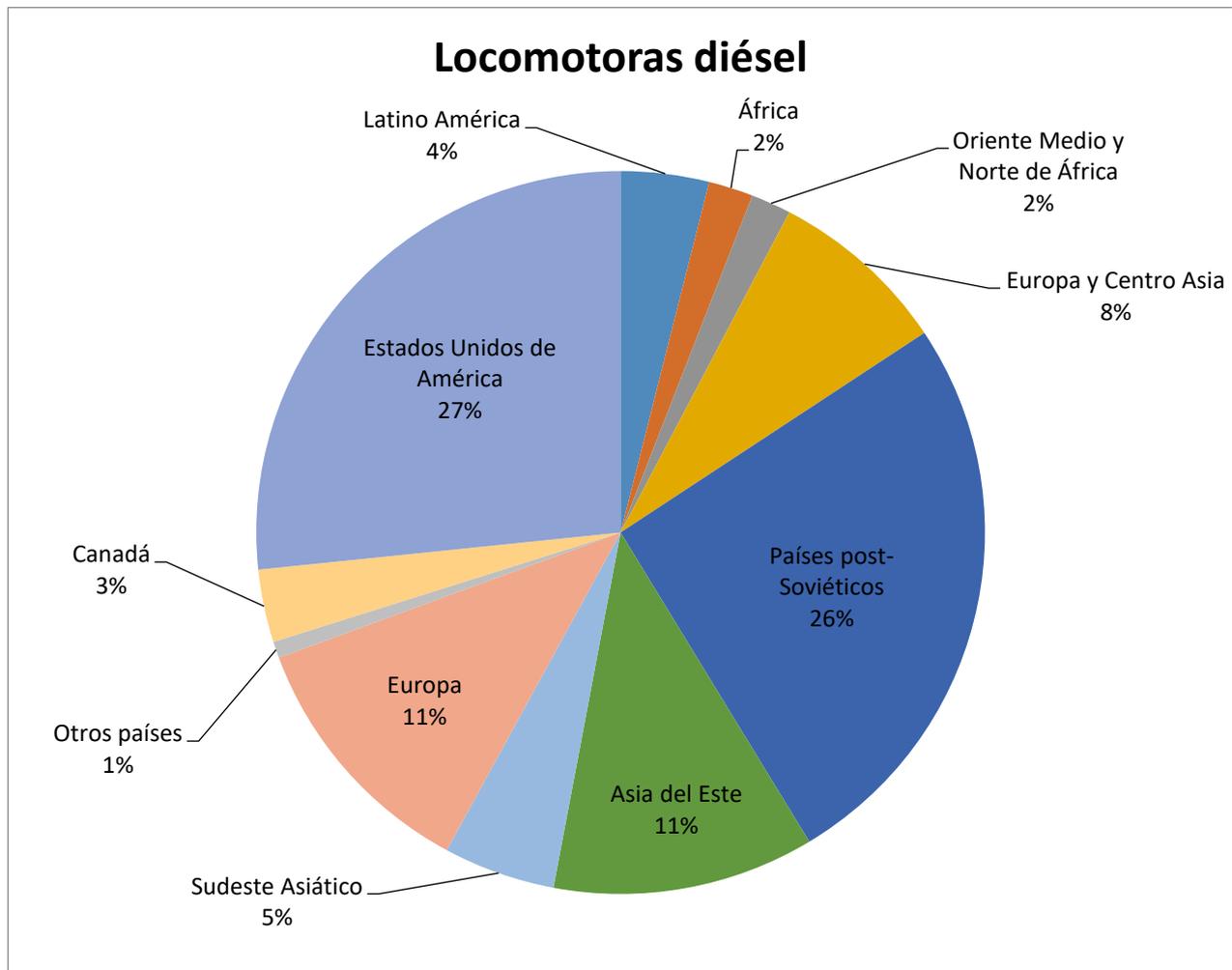
Por ejemplo, en los depósitos de maniobras ferroviarias las locomotoras pueden producir aproximadamente la mitad de todas las emisiones nocivas de partículas diésel, debido a que estas zonas no suelen estar electrificadas. A esto hay que sumarle que la vida útil de los motores de las locomotoras es de muy larga duración, lo que significa que muchas de las locomotoras antiguas y altamente contaminantes siguen en funcionamiento.

Los filtros de partículas diésel (DPF por sus siglas en inglés) y la reducción catalítica selectiva (SCR, una tecnología basada en un catalizador común usado para reducir las emisiones de NO_x) pueden ser instaladas en locomotoras existentes para lograr la reducción de emisiones.

Ahora bien, ¿cuántas locomotoras diésel existen en el mundo?

Según Railways Databases, informe desarrollado por el World Bank en 2007 y que recoge información de unos 151 ferrocarriles en 98 países. De éstos, 102 son (o eran) empresas públicas, 42 son concesiones privadas, y 7 son ferrocarriles privados. De él se extrae que en el mundo a fecha de 2005 había un total de casi 116000 locomotoras diésel, a día de hoy se estima que este número de locomotoras diésel puede haberse reducido y sea de entre 86000 y 93000 ya que en estos últimos años se han dado de baja un buen número de locomotoras, sirva de ejemplo el caso de España que a fecha de 2004 contaba con 479 y hoy tiene 381, casi 100 locomotoras menos en poco más de 10 años. Esto puede ser debido a varios factores, electrificación de las líneas, fin de la vida útil de la locomotora,...

Se localizan en el mundo de la siguiente manera:



Gráfica 1 - Distribución de locomotoras diésel en el mundo*

*Datos obtenidos de WORLD BANK'S RAILWAYS DATABASE.

En esta gráfica se puede observar cómo gran parte de las locomotoras diésel se concentran en Estados Unidos, esto es debido a que tienen mayor facilidad para acceder a combustibles fósiles a un menor precio. De ahí, que apenas tengan líneas electrificadas.

Son muy diversos los motivos por los cuales siguen circulando trenes de tracción diésel, uno de ellos es que hasta ahora la decisión de electrificar una línea se tomaba por la rentabilidad económica de la operación (y, por tanto, del tráfico que ésta tuviera). Con el precio actual del barril de petróleo, este coste inicial de la inversión se compensaría mucho antes con los ahorros de energía conseguidos. Sin embargo, hoy el gestor de la red ferroviaria (que es quien debería costear la electrificación) es distinto de las empresas que luego operan los trenes (que son las que se beneficiarían del ahorro en energía).

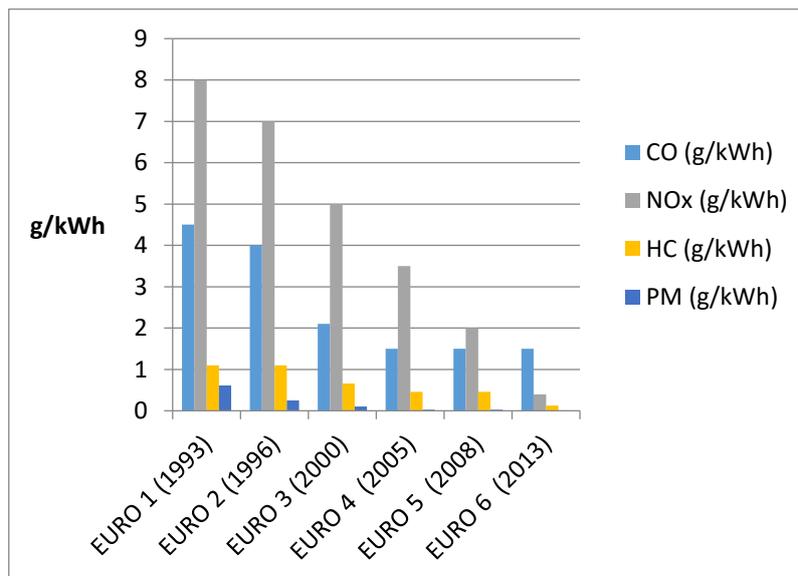
Con la liberalización del transporte ferroviario de mercancías se da además otra circunstancia muy significativa y es que la gran mayoría de las locomotoras de los nuevos operadores privados son de tracción diésel. Esto resulta lógico si empresas privadas como Acciona Rail Services o Continental Rail quieren asegurarse que sus trenes pueden meterse por cualquier vía para cubrir cualquier servicio. La paradoja es que un 52% de las mercancías remolcadas en el país por locomotoras diésel circulan en realidad bajo una catenaria. Son muchos los kilómetros seguidos de líneas electrificadas por donde podría pasar un tren eléctrico, pero se utiliza uno de tracción diésel por los tramos finales o por algún tramo secundario mucho más corto por los que tenga que discurrir.

5.3 Normativa sobre las emisiones atmosféricas de motores diésel

Para la homologación de los vehículos, los valores de emisiones deben estar por debajo de lo exigido por la normativa vigente. La tabla adjunta muestra, en gramos por kilovatio hora, las emisiones máximas toleradas por las diferentes fases y el año de entrada en vigor de éstas para vehículos de nuevo diseño.

Tabla 1 - Evolución de la normativa de emisiones de motores diésel vehículos pesados

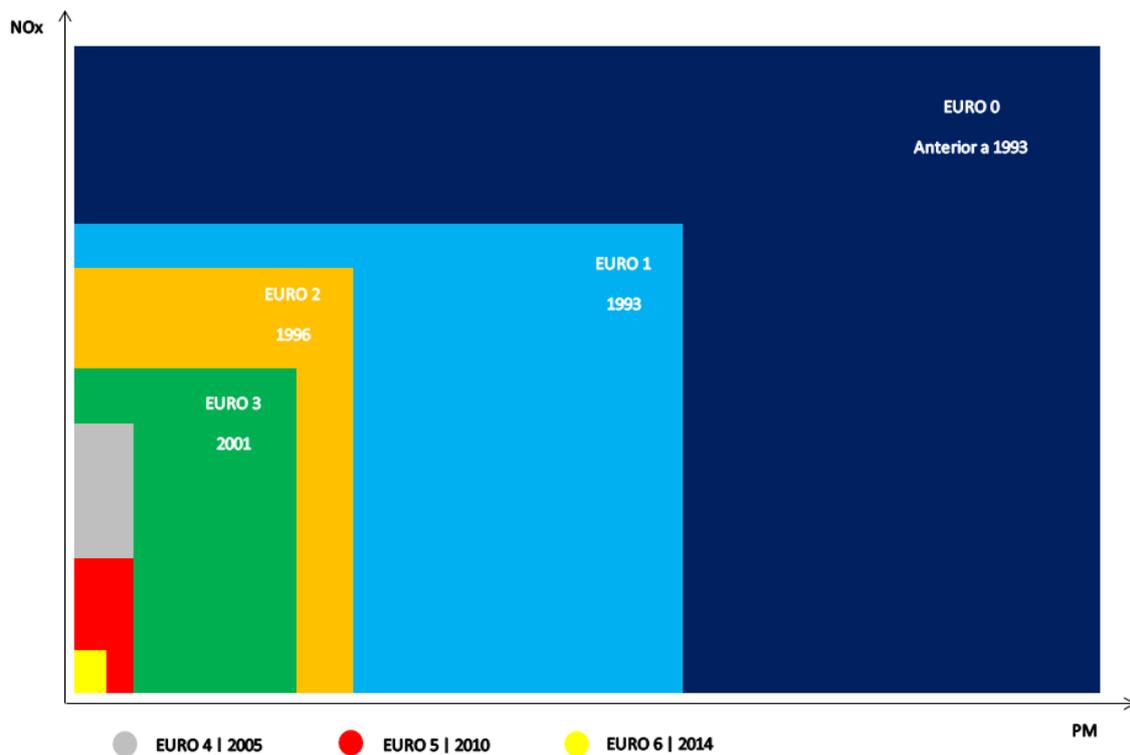
Diésel				
	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NO_x (g/kWh)	PM (g/kWh)
EURO 1 (1993)	4,50	1,10	8,0	0,612
EURO 2 (1996)	4,00	1,10	7,0	0,250
EURO 3 (2000)	2,10	0,66	5,0	0,100
EURO 4 (2005)	1,50	0,46	3,5	0,025
EURO 5 (2008)	1,50	0,46	2,0	0,025
EURO 6 (2014)	1,50	0,13	0,4	0,010



Gráfica 2 - Evolución de la normativa de emisiones

Como se puede observar en la gráfica, los límites de las emisiones de cada componente se han ido reduciendo en las sucesivas normativas.

La gráfica que se muestra a continuación trata de mostrar la exigencia tecnológica y evolutiva a la que tienen que hacer frente los fabricantes de motores diésel en pos de la reducción de emisiones.



La evolución de las normas medioambientales hace necesario el desarrollo de nuevos productos para cada segmento produciéndose una evolución tecnológica:

- **EURO 0 | <1993**
 - Inyección en la precámara
 - Inyección mecánica
 - Bajas presiones
- **EURO 1 | 1993**
 - Turbo
 - Inter enfriadores
- **EURO 2 | 1996**
 - Aumento de la presión de inyección
 - Inyección electrónica
 - Cambio en el diseño del pistón
- **EURO 3 | 2001**
 - Nuevo diseño de inyectores
 - Mayores presiones de inyección
 - Retardo en el tiempo de inyección

- **EURO 4 | 2005** - Incorporación de sistemas de post-tratamiento
- **EURO 5 | 2010** - Medios ambientales
- **EURO 6 | 2014** - Tecnologías en investigación y desarrollo

Hasta la aprobación de la EURO 4, los motores diésel, eran capaces de ajustar sus emisiones de agentes contaminantes ajustando los parámetros de la electrónica del motor, pero a partir de dicha normativa, se hacen imprescindibles elementos de tratamiento de gases en el sistema de escape, dado que sin ellos, el vehículo apenas es capaz de cumplir EURO 4.

5.3.1 NORMATIVA SOBRE EMISIONES DE VEHÍCULOS PESADOS

La normativa de emisiones para motores de vehículos pesados, se estructura en una serie de escalones o fases, 'Tiers' o 'Stages' según normativa de la Agencia de Protección Medioambiental estadounidense (EPA según sus siglas en inglés) y en Europa se las conoce como Euro 1, 2, 3, 4, 5 y 6 en los que se limita la emisión de contaminantes en función de la potencia de los motores.

La regulación de emisiones de camiones de motor diésel de uso pesado se mantiene a través de un conjunto de directivas diferentes que para los vehículos de pasajeros y vehículos ligeros. Si bien los contaminantes evaluados son los mismos, los procedimientos de prueba que se utilizan son diferentes.

El ciclo de prueba de estado estacionario consta 13 modos (ECE-R49) usado para las normas Euro 1 y Euro 2 se reemplazó por dos pruebas en Euro 3, un ciclo de prueba estacionario (European Steady state Cycle, ESC según sus siglas en inglés) y un ciclo de prueba transitorio (European Transient Cycle, ETC según sus siglas en inglés), que evalúan los hidrocarburos no metánicos (NMHC) en vez de todos los hidrocarburos. La prueba ETC también evalúa las emisiones de metano; sin embargo, sólo está regulada para vehículos con motor de gas. Cualquiera de estas pruebas se podría utilizar para la aprobación de tipo de Euro 3; sin embargo, se requieren ambas para la aprobación de Euro IV. Además de la normativa sobre CO, HC, NO_x y partículas, con la Euro 3 se introdujo la regulación sobre humo e hidrocarburos no metánicos, que se evalúan al utilizar el ciclo de prueba de respuesta bajo carga (European Load Response, ELR según sus siglas en inglés). El cambio en los niveles permitidos de estos contaminantes desde Euro 1 a la Euro 6 se muestra en la gráfica 2 del punto 5.3 Normativa sobre las emisiones atmosféricas de motores diésel.

Las normas establecidas mediante cada normativa EURO, definen los niveles máximos de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de partículas (PM), así como de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC). La evolución registrada a lo largo de las distintas fases resulta especialmente notable en cuanto a los niveles máximos de emisión permitidos en óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas (PM) que se reducirán en un 95% de los definidos en la EURO 1 cuando se implemente completamente la EURO 6.

5.3.2 NORMATIVA SOBRE COMBUSTIBLES

Los criterios de emisiones definidos en los distintos niveles han de estar acompañados por una reducción en los niveles de sulfuros contenidos en el combustible. La necesidad de esta reducción se debe a que parte de los sulfuros se convierten en sulfatos en el proceso de combustión, y estos sulfatos se incluyen entre las partículas emitidas (PM), mientras que otra parte de los sulfuros es emitida en forma de óxidos de azufre (SO) también asociados a problemas causados por la contaminación; La reducción en los niveles de sulfuros es imprescindible para la adopción de tecnologías para la reducción de emisiones, como la recirculación de los gases de escape (EGR), los sensores de NO y los tratamientos posteriores. Esta necesidad puede asimilarse al requerimiento de reducir los niveles de plomo en las gasolinas cuando se implantaron los conversores catalíticos. Durante las fases Tier 1 a Tier 3, los niveles de sulfuros en gasóleo agrícola no estaban limitados por normativa medioambiental, debiendo ajustarse a las especificaciones de la industria petroquímica que fijaban un 0,5%, (5000 ppm) de contenido máximo en sulfuros. Este contenido fue limitado por la EPA a 500 ppm a partir de junio de 2007 y a 15 ppm (diésel ultra-bajo en sulfuros) a partir de junio de 2010 para gasóleo de uso agrícola.

5.3.3 PRINCIPALES CONTAMINANTES EN LOS GASES DE ESCAPE DEL MOTOR DIÉSEL

Los principales compuestos contaminantes en los gases de escape producidos por un motor diésel son los siguientes:

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Monóxido de carbono (CO)
- Hidrocarburos (HC)
- Partículas (PM)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Óxidos de azufre (SO_x)

De los mencionados anteriormente, y sobre los que se están centrando todos los estudios y desarrollo de nuevas tecnologías para lograr esa reducción en sus emisiones a la atmósfera son, los NO_x y las emisiones de partículas.

Los NO_x se forman en las fases donde la temperatura alcanza valores máximos, su emisión a la atmósfera produce graves problemas de salud en la población así como efectos ambientales negativos sobre el planeta contribuyendo al efecto invernadero y al smog fotoquímico. La exposición directa a tales óxidos en concentraciones atmosféricas superiores a 3 ppm aumenta las posibilidades de enfermedades pulmonares en niños y agrava los problemas de enfermos cardíacos. Además de su toxicidad, reacciona con los hidrocarburos sin quemar para formar ozono, causante principal del smog fotoquímico, que origina entre otros problemas de salud, irritación de la vista, tos, dolores de cabeza, problemas respiratorios. Además provoca daños en la forestación y afecta de manera alarmante al crecimiento de ciertas variedades de cultivos y frutales. Los NO_x junto con los óxidos de azufre son los principales responsables de la lluvia ácida.

Anualmente más de 30 millones de toneladas de NO_x son emitidos a la atmósfera, siendo generados principalmente en los procesos de combustión en fuentes móviles (automóviles, camiones, transporte público) y fuentes fijas (centrales de potencia, hornos incineradores). Hay también una contribución de otras industrias químicas (producción de ácido nítrico, urea, etc.).

El **material particulado** generado por un motor diésel son perceptibles por el denso humo negro que deja tras de sí un vehículo propulsado por este tipo de motor en plena aceleración. Los hidrocarburos que componen el gasoil son de cadena larga (pesados) y si no son completamente quemados durante la combustión, se condensan al enfriarse cuando se mezclan con el aire ambiente, siendo absorbidos por las moléculas de carbonilla. Cuando el motor trabaja a cargas bajas, la baja temperatura de la cámara dificulta la combustión de los hidrocarburos. Por otro lado, cuando se hace trabajar el motor a plena carga (por ejemplo, en una aceleración), puede ocurrir que una parte de la cantidad de combustible inyectada no encuentre un volumen suficiente de oxígeno como para terminar la oxidación, haciendo que queden tras la combustión largas cadenas de hidrocarburos parcialmente oxidadas. El principal peligro de estas partículas es que tienden a depositarse sobre el tejido pulmonar cuando son inhaladas, teniendo un efecto potencialmente cancerígeno.

Tras la aprobación de las distintas normativas medioambientales y protocolos como el de Kioto, los fabricantes han tenido que realizar importantes inversiones en investigar y desarrollar nuevas soluciones que permitiesen ceñirse a las continuas restricciones de emisión de contaminantes a la atmósfera.

Otros contaminantes:

- Monóxido de carbono (CO):

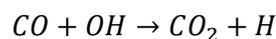
En una combustión completa de hidrocarburos, los productos a los que da lugar la reacción química son agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂). Sin embargo, cuando la combustión no es completa se pueden formar otros productos como el monóxido de carbono.

El monóxido de carbono es el producto de la oxidación parcial de las cadenas de carbono del combustible, por tanto por cada molécula que se forma de monóxido de carbono, se deja de formar una de CO₂.

La química del monóxido de carbono es la siguiente:



A medida que la temperatura aumenta, la reacción se desplaza hacia la formación de CO. En último lugar, el monóxido de carbono se oxida, a un ritmo más lento, transformándose en CO₂.



El principal factor que afecta a la formación de este contaminante, es la cantidad de aire disponible en el momento de la combustión, de forma que cuanto mayor sea ésta, menor será la formación de este contaminante dado que el carbono tendrá oxígeno suficiente para oxidarse por completo.

Las consecuencias para la salud son que al ser inhalado, éste se adhiere rápidamente con la hemoglobina de la sangre, envenenando los glóbulos rojos y reduciendo la capacidad de transporte de oxígeno de los pulmones a las células del organismo ya que la función de los glóbulos rojos es la de transportar el oxígeno de los pulmones a las células.

Exposiciones a este gas producen dolor de cabeza, reducción del discernimiento mental y, tras dos horas de exposición, la capacidad de la sangre para transportar oxígeno disminuye en un 90%. Aun en concentraciones de 15 ppm, comunes en áreas de alto tránsito de vehículos, sus efectos son notorios, especialmente en personas con afecciones nerviosas, cardiovasculares o pulmonares.

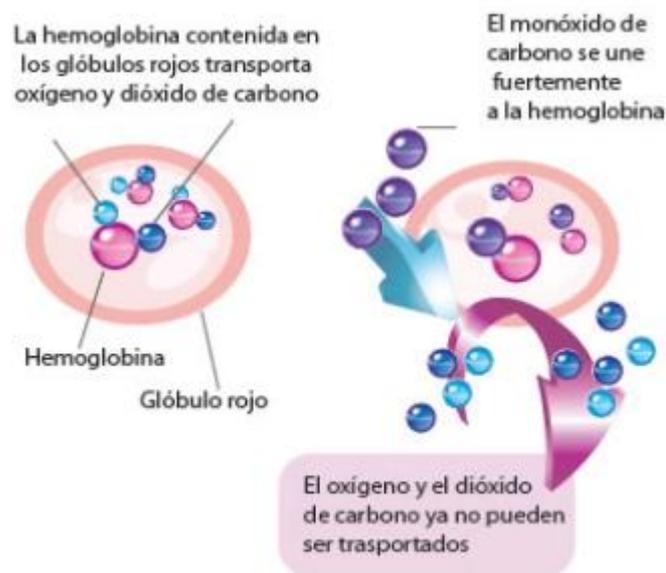


Figura 1 - Fijación del monóxido de carbono a la hemoglobina

- Hidrocarburos inquemados

El combustible empleado por los motores de encendido por compresión o tipo diésel, es un hidrocarburo de cadena larga y por tanto pesado. Las emisiones de hidrocarburos son consecuencia de la combustión incompleta de dicho combustible.

Los hidrocarburos oxigenados están presentes en los gases de escape y son conocidos por su participación en la formación del smog fotoquímico. Las reacciones fotoquímicas que originan este fenómeno se producen cuando la mezcla de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos volátiles reaccionan inducidos por la luz solar, en un complejo sistema de reacciones que forma ozono (O_3) que es una molécula que sigue reaccionando con otros contaminantes presentes en el aire. Esta reacción se ve favorecida en los casos de fuerte sol y poco viento, ya que dificultan la dispersión de los contaminantes, produciendo el oscurecimiento de la atmósfera dejando un aire teñido de color marrón rojizo y cargado de componentes dañinos para los seres vivos.

En todas las ciudades del mundo hay problemas con este tipo de contaminación, pero especialmente las que están en lugares con clima seco, cálido, soleado, con poco viento y tienen muchos vehículos. De ahí, que estén empezando a tomar medidas como restricciones en el tráfico rodado, limitar la velocidad, prohibición de estacionamiento de vehículos en el centro de las ciudades.

A la hora de formarse HC durante la combustión intervienen varios factores:

1. La dosificación estequiométrica: Cuanto mayor sea la dosificación (mezcla más rica) mayor será la formación de hidrocarburos inquemados. La explicación radica en que cuanto menor es la disponibilidad del oxígeno para el combustible, más opciones existen de que éste se quede sin quemar. Pero dosados excesivamente bajos también dispara la formación de hidrocarburos, debido a que no hay suficiente combustible como para propagar correctamente la llama y, por tanto, el combustible saldrá sin ser transformado.
2. La temperatura de la llama: al contrario que al NO_x , a la fracción de combustible sin quemar le afecta de manera inversa la temperatura. Dado que cuanto mayor sea la temperatura más opciones existen de que el combustible se quemara.

- Óxidos de azufre (SO_2)

Los óxidos de azufre son gases incoloros que se forman al quemar azufre. El dióxido de azufre (SO_2) es el contaminante criterio que indica la concentración de óxidos de azufre en el aire. La fuente primaria de óxidos de azufre es la que proviene directamente del gasóleo, de hecho, la cantidad del azufre que es emitido al aire (como dióxido de azufre) es casi la misma cantidad de azufre presente en el combustible.

Las consecuencias sobre la salud son que perjudican el sistema respiratorio, especialmente de las personas que sufren de asma y bronquitis crónica. A nivel medio ambiental, los óxidos de azufre también son responsables de algunos efectos sobre el bienestar, el de mayor preocupación es la formación de lluvia ácida, aumentando la acidez de las aguas de ríos y lagos, produce trastornos importantes en la vida acuática. Algunas especies de plantas y animales logran adaptarse a las nuevas condiciones para sobrevivir en la acidez del agua, pero otras no. También aumenta la acidez de los suelos, y esto origina cambios en la composición de los mismos, produciéndose la lixiviación de importantes nutrientes para las plantas (como el calcio) e infiltrando metales tóxicos, tales como el cadmio, níquel, manganeso, plomo, mercurio, que de esta forma se introducen también en las corrientes de agua. La vegetación sufre no sólo las consecuencias del deterioro del suelo, sino también un daño directo por contacto que puede llegar a ocasionar en algunos casos la muerte de la especie. Las construcciones históricas, que se hicieron con piedra caliza, experimentan también los efectos de la lluvia ácida. La piedra al entrar en contacto con la lluvia ácida, reacciona y se transforma en yeso (que se disuelve con el agua con mucha facilidad). También los materiales metálicos se corroen a mucha mayor velocidad.

En la actualidad, las emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos inquemados (HC) y los óxidos de azufre (SO_x) no suponen un problema en los motores diésel. En el caso de los monóxidos de carbono (CO) e hidrocarburos inquemados (HC) esto es debido a que son motores que trabajan con exceso de aire (oxígeno) y por lo tanto la combustión es mucho más completa que en los motores de gasolina, y además, en los tubos de escape se colocan convertidores catalíticos de oxidación que finalizan el proceso. Respecto a los SO_x, la normativa de carburantes hace que hoy día el gasóleo (diésel) comercial no tenga prácticamente nada de azufre y por tanto no se generan gases sulfurosos.

En cambio, las partículas y los NO_x siguen siendo problemáticos y son necesarias medidas adicionales como sistemas SCR (Selective Catalytic Reduction), válvula EGR (Exhaust Gas Recirculation) o un filtro de partículas diésel (Diesel Particulate Filter, DPF).

5.3.4 BENEFICIOS ESPERADOS DEL PROGRAMA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES

Según el estudio llevado a cabo por la Agencia de Protección Medioambiental estadounidense (EPA), en el año 1996, la contribución de los motores diésel de vehículos todoterreno, locomoción y marinos al nivel de partículas en suspensión por debajo de 2,5 µm (PM_{2.5}) se situaba en un 40% del total procedente de vehículos y barcos, así como un 25% del total de óxidos de nitrógeno (NO_x) procedente de vehículos y barcos, con una proyección temporal al alza de hasta el 44% para PM_{2.5} y del 47% para NO_x para el año 2030, en caso de no desarrollarse la norma final (Tier 4).

En el mismo estudio, la EPA cuantificó los costes y beneficios derivados de la implantación de la norma en EEUU, determinando unos beneficios en gasto sanitario cuantificables de 80.000 millones de dólares americanos por año, mucho mayores que los costes, estimados en 2.000 millones de dólares americanos por año (asociados a la necesaria adaptación de motores y combustible).

5.3.5 TECNOLOGÍAS EMPLEADAS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA Y REDUCCIÓN DE EMISIONES

La notable reducción en los niveles máximos de emisiones permitidos ha supuesto que los fabricantes de motores para máquinas y tractores agrícolas hayan tenido que desarrollar nuevos sistemas para que sus motores se ajustasen a la normativa.

El desarrollo de los motores ha experimentado un gran impulso en los últimos años, incorporando mejoras destinadas a la consecución de una combustión más uniforme entre el combustible y el oxígeno del aire introducido en los cilindros.

Los sistemas de inyección mecánicos han sido sustituidos por los sistemas de inyección de raíl común o 'common rail'. En estos sistemas, una bomba de combustible de alta presión es accionada por el cigüeñal para mantener la presión deseada en el raíl común de forma controlada. Los inyectores, controlados electrónicamente, se

encuentran conectados al raíl común mediante conductos de alta presión, y producen la inyección de combustible en el momento requerido. Los sistemas de raíl común alcanzan presiones excepcionalmente altas, superiores a los 200 MPa (2000 bar). Los sistemas de inyección de raíl común proporcionan una gran flexibilidad respecto a los mecánicos ya que permiten la ejecución de múltiples inyecciones durante un mismo ciclo.

Además del combustible, el otro elemento necesario para que se produzca la combustión es el oxígeno procedente del aire. Los sistemas de turboalimentación comprimen el aire en la admisión empleando la energía de los gases de escape. El empleo de turbocompresores o turbos es casi un requerimiento en los modernos motores con bajas emisiones y la refrigeración del aire a la salida del compresor y antes de la entrada al cilindro es común (son los sistemas denominados 'intercooler'). El accionamiento de los turbocompresores a elevadas velocidades del motor puede resultar excesivo por lo que se han desarrollado mecanismos para que los gases de escape puenten la turbina, o más recientemente los denominados turbocompresores de geometría variable (TGV) que reducen el empuje de los gases de escape sobre la turbina a elevadas velocidades. La turboalimentación incrementa el flujo de entrada de aire, y por lo tanto de oxígeno, con ello se permite incrementar la cuantía del combustible inyectado incrementando la densidad de potencia del motor (relación potencia/peso del motor). Además, se incrementa la eficiencia de empleo del combustible porque el motor puede ser más pequeño y tener menos fricción porque la potencia requerida para la compresión del aire de la admisión se obtiene de la expansión de los gases de escape. Los mencionados sistemas de inyección y admisión, combinados con desarrollos en la gestión electrónica de los motores, han supuesto importantes mejoras en cuanto a su eficiencia, permitiendo además la reducción de contaminantes como el monóxido de carbono (CO).

La entrada en vigor del Tier 4 supone sin embargo un importante reto, ya que implicará una drástica reducción en los niveles permitidos de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de partículas (PM). La limitación de estas emisiones de los vehículos agrícolas se basa en dos estrategias complementarias. La primera de ellas es la reducción de contaminantes producidos durante la combustión, la segunda es el tratamiento de los gases expulsados por el motor previo a su liberación a la atmósfera.

5.3.6 FORMACIÓN DE PARTÍCULAS Y NO_x DURANTE LA COMBUSTIÓN

Las partículas generadas durante la combustión en los motores diésel comprenden partículas de hollín, una fracción orgánica soluble y sulfatos. La formación de partículas está muy ligada a las condiciones de combustión en el motor y se fomenta cuando la combustión se produce con una elevada riqueza en combustible (generalmente producida en zonas en que la mezcla combustible-aire resulta deficiente).

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) comprenden el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) y se forman durante la combustión del diésel a elevada temperatura, debido a la reacción entre el nitrógeno (N_2) y el oxígeno (O_2) procedentes del aire.

Un aspecto negativo en cuanto al control de estos contaminantes es que las condiciones de combustión que producen la reducción de uno de ellos (PM o NO_x), normalmente incrementan la del otro (NO_x o PM).

5.3.7 TECNOLOGÍAS EMPLEADAS PARA LA REDUCCIÓN DE PM Y NO_x

Los sistemas de recirculación de los gases de escape (EGR según sus siglas en inglés) emplean una parte de los gases procedentes del escape para reintroducirlos de nuevo en el cilindro junto con el aire procedente de la atmósfera. La introducción de estos gases de escape incrementa la masa no reactiva en el cilindro y con ello se reducen las temperaturas máximas en la combustión, lo que a su vez reduce la formación de los óxidos de nitrógeno (NO_x). Para alcanzar una reducción significativa en la temperatura de la combustión, evitando temperaturas locales excesivas, resulta necesario el empleo de grandes cantidades de EGR.

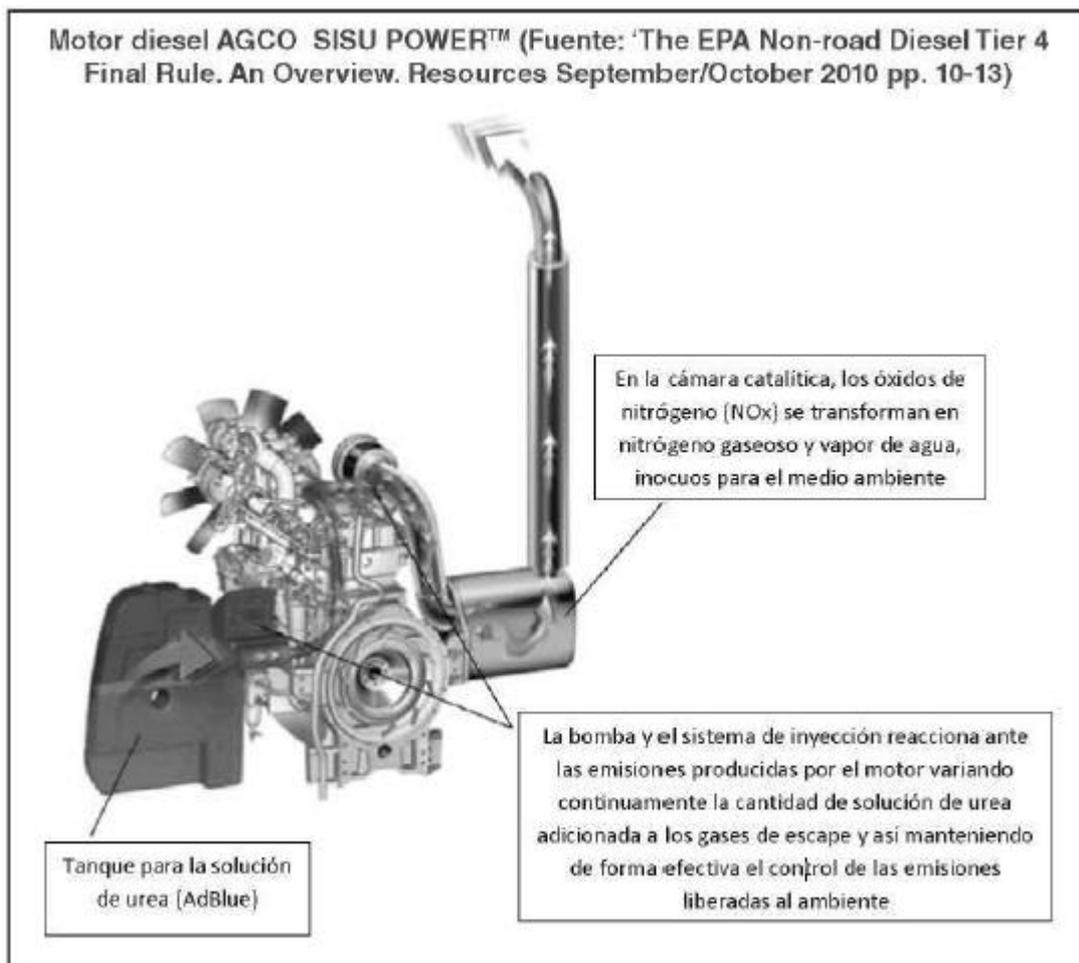


Figura 2 – Motor diésel con sistema SCR

Los sistemas EGR más simples retienen parte de los gases de escape en el cilindro o introducen directamente una parte en el conducto de admisión. Pero en estos, los gases de escape no son refrigerados y por ello la reducción de los NO_x es relativamente pequeña. Los sistemas externos de EGR permiten la refrigeración de los gases de escape

(cEGR) al fluir por un conducto o más intensamente mediante un intercambiador de calor empleando líquido refrigerante del motor o aire. Los sistemas EGR refrigerados son mucho más eficientes en la reducción de NO_x y permiten la recirculación de un mayor volumen de gases de escape.

La reducción en las emisiones de partículas procedentes del motor se puede conseguir mediante el paso a través de filtros de partículas. Los filtros de partículas permiten separar la materia en forma de partículas de los gases de escape producidos por los motores. Las partículas de hollín retenidas por los filtros pueden ser eliminadas mediante su oxidación empleando el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el oxígeno (O_2), en un proceso denominado regeneración.

La oxidación de las partículas mediante NO_2 se produce a las temperaturas normales de operación del motor (en torno a 300°C) por lo que se denomina regeneración pasiva. La oxidación de las partículas mediante O_2 requiere temperaturas por encima de 550°C por lo que resulta necesario elevar la temperatura de los gases de escape y se denomina regeneración activa.

La mayor parte del óxido de nitrógeno formado durante la combustión se produce en forma de NO por lo que en el caso de la regeneración pasiva es necesaria la intervención de un catalizador de oxidación que incremente los niveles de NO_2 . En el caso de la regeneración activa, los niveles de O_2 normalmente presentes en los gases de escape superan el 5% por lo que la única limitación es la temperatura antes mencionada, que hace necesaria la implementación de sistemas para el calentamiento de los gases de escape (quemadores o catalizadores oxidativos).

La reducción de los óxidos de nitrógeno (NO_x) puede llevarse a cabo mediante el tratamiento posterior de los gases de escape, este es el caso de los sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR según sus siglas en inglés). Estos sistemas se basan en la reducción de los óxidos de nitrógeno (NO_x) por medio de su reacción con amoníaco (NH_3) para formar nitrógeno gaseoso (N_2) y agua (H_2O) y que se produce de forma eficiente para una ventana de temperaturas entre los 150°C y los 500°C . La aplicación de esta tecnología requiere disponer de amoníaco para lo cual se emplea una solución de alta pureza de urea en agua al 32,5% denominada AdBlue[®] en la Unión Europea o fluido para escapes diésel (DEF) en EEUU. El AdBlue[®] se congela por debajo de los -11°C y se descompone por encima de los 65°C por lo que resulta necesario planificar los sistemas de almacenamiento y transporte dentro y fuera de las máquinas que lo utilicen. El aditivo es inyectado en el sistema de escape, aunque esta inyección debe producirse solamente cuando el motor ha alcanzado una temperatura adecuada ya que si se inyecta en frío la mezcla no se descompone totalmente para formar amoníaco.

5.4 Medidas adoptadas en otros medios de transporte

- **Camiones**

Desde que entrara en vigor la normativa Euro 6 para todos aquellos camiones que se matriculen nuevos, y durante este tiempo se ha comprobado que la idea básica del transporte por carretera ha sufrido un verdadero cambio con la aplicación de la tecnología necesaria para cumplir con los niveles exigidos en esta normativa.

La norma Euro 5 ya representó un verdadero quebradero de cabeza para los transportistas, al tener que elegir entre dos sistemas diferentes. Unos fabricantes apostaron por el post-tratamiento de esos mismos gases mediante la adición de AdBlue® (SCR), la mayoría, mientras alguno lo hizo por la recirculación de gases de escape (EGR). Pero los exigentes niveles de óxido de nitrógeno y partículas establecidos por la nueva Euro 6 produjeron otra vuelta de tuerca, y obligó a los fabricantes a desarrollar sofisticadas tecnologías para alcanzar esos mínimos niveles de emisiones. Mientras con los motores Euro 5 el planteamiento por parte de los fabricantes estaba claro, recirculación de gases o inyección de urea, pero con la misma tecnología para todos, la norma Euro 6 ha cambiado todo este planteamiento, y cada uno de ellos ha adoptado diferentes soluciones, si bien las dos grandes tecnologías anteriores, SCR y EGR, se han mantenido sin grandes cambios, aunque con la fuerte aparición de los filtros que complementan el sistema.

Uno de los más graves inconvenientes que tiene el sistema de recirculación de los gases de escape es que el motor está obligado a trabajar en altas temperaturas, lo que podría repercutir negativamente en la vida útil del mismo. Por esta razón, en esta nueva etapa, es el AdBlue® el que parece que ha ganado más protagonismo, siempre con sus inseparables filtros, aunque, en la mayoría de los casos, de una u otra manera, ha necesitado el apoyo de la recirculación de gases, dependiendo de qué fabricante estemos hablando.

En una visión general, se podría decir que la utilización conjunta de ambas técnicas ha sido la opción seguida por un mayor número de fabricantes, aunque alguno de ellos han preferido apostar de manera decidida por el uso únicamente de la urea, y otros utilizan las dos tecnologías pero recurren a la recirculación sólo para ciclos en frío, con la intención de aumentar la temperatura del motor para que el SCR pueda cumplir con su cometido, no para la simple reducción de emisiones.

Con los filtros aparecen nuevos componentes en los motores y, por lo tanto, nuevas responsabilidades para el conductor, ya que estos elementos necesitan mantenimiento y cada

fabricante ha seguido diferentes caminos para dar servicio a los nuevos tamices. De hecho alguno de los constructores cuenta con el conductor para que el sistema nunca deje de funcionar como debe.

El fabricante de los Países Bajos, DAF, ha optado por la tecnología conjunta, es decir, aplicar tanto la recirculación como la aplicación de urea con un nuevo inyector. Además, de un nuevo diseño del bloque, el motor MX-13 incorpora un nuevo sistema de inyección mediante “common rail”, que soporta presiones hasta 2.500 bar, junto a un nuevo turbo de geometría variable.

Por otro lado se han colocado una serie de filtros, con los que se controla la emisión de partículas, y otro inyector con el que se distribuye la urea para su mezcla con los gases de escape.

Todo este proceso conlleva un nuevo problema y es que se crea hollín por lo que además del mantenimiento normal, DAF ha integrado en su salpicadero un indicador de impurezas del filtro con varios niveles de obstrucción. Dependiendo de este nivel, el sistema se regenera de manera automática, con ayuda del conductor, siguiendo unos sencillos pasos en los que el conductor básicamente decide cuando y donde comienza el proceso de limpieza, y por último, sólo en casos extremos, será necesario que sea el concesionario quién actúe.

Junto a la presentación del nuevo Stralis Hi-Way, Iveco sorprendió ofreciendo un motor Euro 6 HI-eSCR (High Efficiency SCR). Desarrollado conjuntamente con FPT Industrial el fabricante italiano apostaba claramente por la inyección de urea. Mediante un sistema de inyección “common rail” de última generación, con una presión máxima de 2.200 bares y una nueva unidad de control electrónico, Iveco ha incrementado la eficiencia del motor, y, como ocurre en otros fabricantes, sumar una serie de filtros para reducir partículas y óxidos nitrosos.

El sofisticado sistema de Iveco se compone de catalizador de oxidación diésel, filtro pasivo de partículas diésel, módulo de medición de AdBlue®, reducción catalítica selectiva y limpiador de catalizador.

Este tipo de filtros demandan una serie de cuidados y mantenimientos que hasta ahora no eran necesarios. Para evitar la intervención del conductor, Iveco ha preferido que la limpieza y el mantenimiento, que se realiza cada 450.000 km, sea llevado a cabo por el concesionario que además decidirá si dentro de este proceso basta con una simple limpieza o si es necesario la sustitución de parte del filtro o del filtro completo para su buen funcionamiento. Este sistema, no obstante, requiere un mayor consumo de AdBlue®, aunque su incremento no llega a ser significativo.

La experiencia acumulada a lo largo de los últimos años por MAN, gracias a apostar por las dos tecnologías en competencia para cumplir con la Euro 5, le permite ahora ofertar una arquitectura que

armoniza ambos mecanismos, EGR más SCR, combinados con sus nuevos filtros para la contención de las partículas y los NO_x.

De esta forma, el sistema empleado por MAN para conseguir cumplir los niveles establecidos por la norma Euro 6, consta de dos fases, la primera en el motor, con inyección “common rail” a 1.800 bar, recirculación de bases EGR y turbo de dos etapas, y una etapa posterior en la que se aplica el sistema SCRT, compuesto por un primer filtro de oxidación y otro de partículas más sensor, seguido del dosificador de AdBlue®, el catalizador SCR y uno más de oxidación.

MAN ha preferido la regeneración continua de sus filtros, por lo que los ha dotado de una serie de sensores que avisan al sistema de su estado aunque éste va trabajando de manera continuada para mantenerlos limpios.

Mercedes Benz fue uno de los primeros fabricantes en integrar esta nueva tecnología en su oferta, dos años antes incluso de que la norma entrara en vigor, con el lanzamiento de su nuevo Actros, un vehículo completamente nuevo.

Aunque en la norma Euro 5 había apostado claramente por la utilización del AdBlue®, pero la integración del sistema de recirculación de gases EGR no fue obstáculo para este fabricante alemán gracias a la experiencia de su filial Detroit Diesel, que ya llevaba muchos años utilizando este sistema.

Pero no solo fue ese el cambio experimentado por Mercedes Benz con la Euro 6, sino que abandonó su política de motores en uve, centrándose en la fabricación de plantas de potencia de seis cilindros en línea, que utilizan de forma conjunta tanto la recirculación como la inyección de urea después de que los gases de escape hayan sido tratados por una serie de filtros.

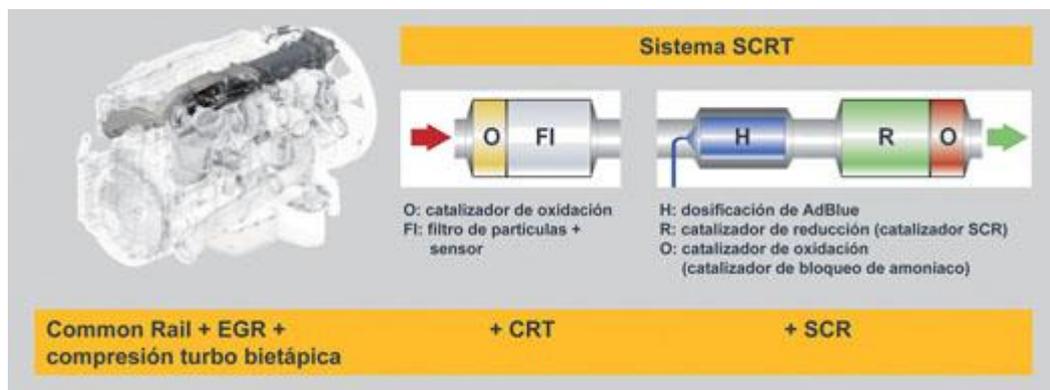


Figura 3 - Sistema SCRT

Para el EGR tienen dos válvulas, la primera de ellas es específica para que los gases sean quemados de nuevo y la segunda para los ciclos fríos. El sistema cuenta además con una serie de avisadores, luces amarillas, que cuando se exceden los niveles de emisiones sea realizado un mantenimiento fuera de los normalmente previstos.

La generación de motores Euro 6 del fabricante francés Renault Trucks se basa en los mismos bloques Euro 5, a los que se les sometió a una profunda remodelación que afectó al 50% de sus componentes.

Para la obtención de los niveles Euro 6 Renault Trucks se fundamenta en la reducción catalítica producida por la urea, cuyo sistema ha sido revisado y mejorada su eficiencia gracias al empleo de nuevos materiales. No obstante, se apoya de manera, digamos indirecta, en la recirculación de gases, ya que utiliza esta tecnología sólo en las fases frías.

Este fabricante ha creado un sistema específico de derivación de los gases de escape, los cuales son reinyectados calientes en el colector de admisión. En determinadas fases de funcionamiento, el aumento de temperatura puede obtenerse también utilizando la válvula de escape que, al variar de presión, permite aumentar rápidamente la temperatura del motor.

Al igual que en el resto de competidores, Renault Trucks basa buena parte del resultado del nivel de emisiones en la actuación de los filtros, y ha optado por facilitar en cierta manera la sustitución de los mismos, trabajo que ha de realizarse con ciertas condiciones por lo que el lugar más adecuado sería un taller, es decir, hacerlo en carretera sería un poco más complicado. No obstante el sistema prevé los posibles inconvenientes y avisa con el suficiente tiempo como para que no se complique el mantenimiento.

Scania, fabricante nórdico ha sido otro de los pioneros en aplicar la tecnología Euro 6, y la gran experiencia adquirida al explotar ambos métodos durante la fase del Euro 5, le ha permitido la posibilidad tanto de trabajar con urea y recirculación de gases, como con tan sólo urea. Por ello, Scania ofrece ahora la posibilidad de elegir entre motores que emplean ambas tecnologías, o mecánicas solo con el sistema SCR.

De sus anteriores motores Scania mantiene su sistema de inyección de alta presión XPI, completado con inyección mediante “common rail” a 2.400 bar y turbocompresor de geometría variable.

Quizás, una de las partes más complicadas y a la vez más efectivas para obtener estos resultados en el Euro 6, es el silenciador integrado. En él se juntan el catalizador de oxidación, "oxicat", un filtro de partículas, dos catalizadores SCR paralelos y dos catalizadores “slip amonio”. Además de todo

esto el sistema cuenta también con un nuevo dosificador de AdBlue® patentado por Scania mientras que la regeneración del filtro de partículas de Scania es automática.

Volvo, el otro fabricante sueco también ha probado varias opciones, pero parece que se está decantando por la utilización del séptimo inyector y un uso sólo para las etapas frías de la recirculación de gases.

Herederos del anterior grupo Euro 5, el nuevo motor Euro 6 de seis cilindros en línea mantiene los inyectores unitarios y el tratamiento catalítico de los gases de escape (SCR). En algunos casos, para cumplir los nuevos requisitos sobre emisiones, también utiliza la recirculación de los gases de escape (EGR), así como un filtro de partículas diésel (DPF), sistemas que Volvo Trucks ya utilizó durante varios años en Estados Unidos y en Japón.

Pero de toda esta novedosa tecnología, quizá la parte más destacada sean los nuevos filtros con los que logran reducir las partículas, el DOC con el que generan el NO₂ necesario para la eficiencia del filtro de partículas y el ASC que se encarga de filtrar los restos de amoníaco, si se produjeran. El fabricante escandinavo ha preferido la regeneración automática del filtro para los periodos entre mantenimientos sin la intervención del conductor.

- **Buques**

Actualmente, más del 90% de los buques son movidos por motores. La mayoría de los combustibles de motores marinos son fuelóleos pesados, los cuales son más baratos que otros combustibles más refinados, pero presentan el inconveniente de que contienen una cantidad importante de sustancias contaminantes tales como azufre, cenizas, asfaltenos, etc, lo cual provoca que los buques emitan cantidades importantes de óxidos de azufre (SO_x) y partículas. Además, los buques también emiten cantidades importantes de óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de carbono (CO₂).

Debido a la importancia de las emisiones contaminantes de los buques, principalmente óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas y dióxido de carbono, a lo largo de los últimos años se han ido desarrollando diversas tecnologías. Destacan principalmente las medidas de reducción de óxidos de nitrógeno debido a la normativa IMO Tier, que limita los niveles de emisión de NO_x a los siguientes valores, aplicados a motores construidos después del año 2000 (IMO Tier I), 2011 (IMO Tier II) y 2016 (IMO Tier III para áreas especiales).

De manera general, las medidas de reducción de emisiones se pueden agrupar en medidas primarias y secundarias. Las medidas primarias consisten en la modificación de algún parámetro relacionado con el funcionamiento del motor, por ejemplo inyección de combustible, diagrama de distribución,

presión y temperatura de trabajo, etc. Por otro lado, las medidas secundarias reducen las emisiones en los gases de escape una vez que éstos ya han sido emitidos. Las principales medidas primarias y secundarias aplicadas en los motores de buques se resumen a continuación:

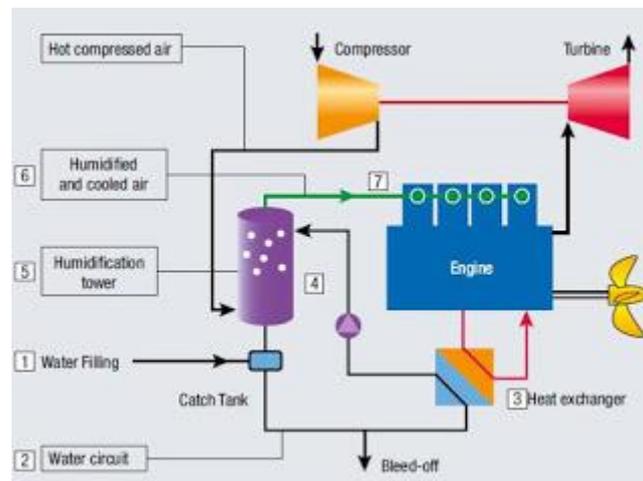
MEDIDAS PRIMARIAS

- Modificación de los tiempos y el mapa de inyección de combustible:

Con el fin de conseguir una combustión más perfecta y con ello reducir las emisiones, en los motores actuales es frecuente jugar con el instante de comienzo de la inyección, presión de inyección, geometría de los inyectores o incluso realizar la inyección por tramos. En este sentido, destaca el sistema “common rail” basado en hacer pre-inyecciones o post-inyecciones antes y después de la inyección principal. De este modo se reduce la formación de NO_x ya que esta depende tanto de la temperatura como del tiempo que dura el pico de alta temperatura. Con los modernos sistemas de inyección secuencial se puede conseguir alrededor de un 20% de reducción de NO_x con muy poco aumento en el consumo específico de combustible.

- Enfriamiento del aire de admisión:

El aire que pasa por el turbo es aconsejable enfriarlo antes de entrar al motor. Con esta medida se reducen notablemente las emisiones de óxidos de nitrógeno puesto que éstos se originan cuanto más elevadas sean las temperaturas de combustión.

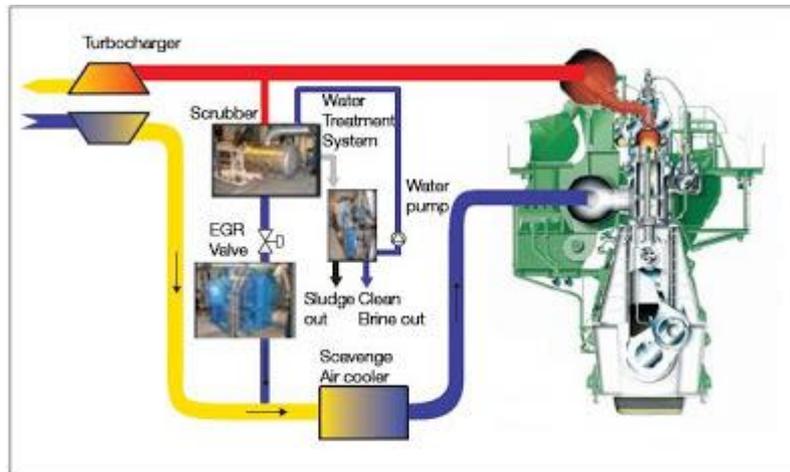


- Inyección de agua:

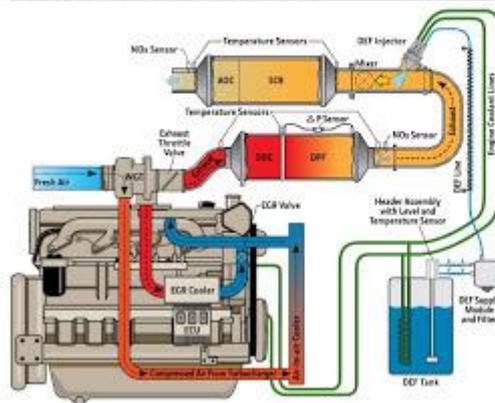
Ésta es también una medida para reducir los óxidos de nitrógeno. Inyectando una pequeña cantidad de agua con el combustible, o bien en forma de humedad en el aire de barrido, lo que se consigue es reducir las temperaturas de combustión y con ello las emisiones de óxidos de nitrógeno.

- Recirculación de gases de escape (EGR, exhaust gas recirculation):

Otra medida para reducir los óxidos de nitrógeno. Recirculando una pequeña parte de los gases de escape y mezclándolos con el aire de barrido también permiten una reducción de las temperaturas de combustión y con ello los óxidos de nitrógeno.



PowerTech PWS Final Tier 4 technology



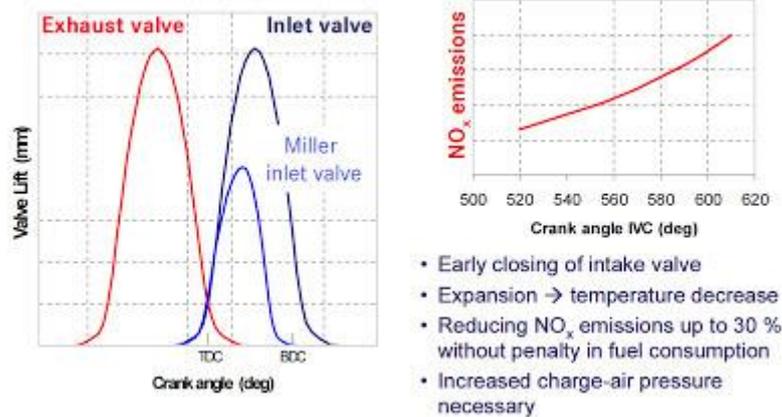
Wastegated turbocharger

Wastegated turbochargers are designed to develop more airflow at lower engine speeds to improve low speed torque. The wastegate control device bleeds off a portion of the exhaust flow at higher engine speeds. Wastegated turbos deliver improved transient response and higher peak torque without compromising engine envelope size.

- Ciclo Miller:

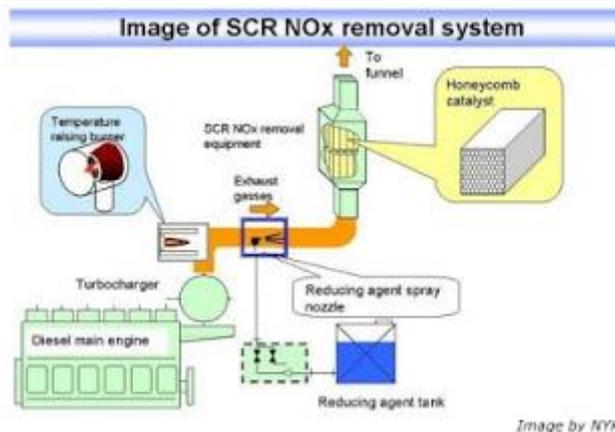
El ciclo Miller fue introducido en los motores diésel en primer lugar para reducir la emisiones de NO_x , que como se sabe es una de sus principales desventajas. La idea es bajar la temperatura de combustión. El avance en el diseño de turbocompresores con mayores relaciones de compresión cada vez, permitió disminuir el trabajo de compresión mecánico para la misma presión final, de esta manera aumentando la capacidad de refrigeración después del turbocompresor, se puede mantener la temperatura de inicio de la compresión en los mismos valores, y por lo tanto la temperatura final de compresión disminuye.

Transformando un motor diésel al ciclo Miller, se puede llegar a un 20% de reducción de NO_x sin incrementar nada el consumo de combustible. El motor de media velocidad Sulzer ZA40S ha sido adaptado con éxito para operar con ciclo Miller, al igual que algunos motores del fabricante MAK.

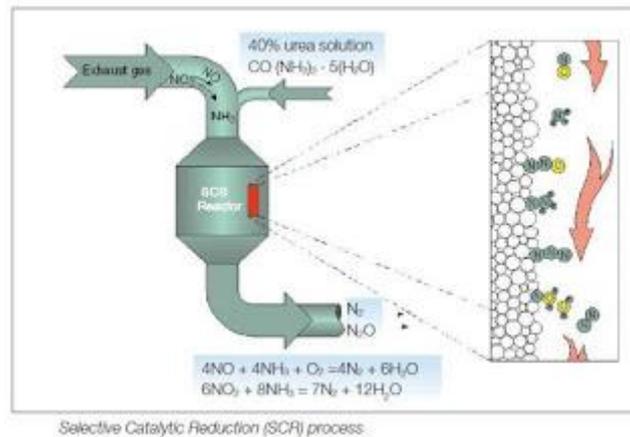


MEDIDAS SECUNDARIAS:

Aunque es posible a un coste razonable reducir gran parte de los óxidos de nitrógeno con medidas primarias, también se utilizan medidas secundarias. La medida secundaria más utilizada para reducir los óxidos de nitrógeno es la de SCR (Reducción Catalítica Selectiva). El sistema se basa en la inyección de amoníaco o urea (que normalmente se comercializa mediante un compuesto llamado AdBlue®) a los gases de escape. Este compuesto reacciona con los óxidos de nitrógeno produciendo nitrógeno y vapor de agua, los cuales no son contaminantes para el medio ambiente. Se llaman catalíticos (a diferencia de los SNCR, reducción no catalítica selectiva) porque emplean catalizadores con el fin de acelerar la velocidad de la reacción química.



Para reducir los óxidos de azufre, existen unos equipos llamados desulfuradores. Al igual que los SCR, el funcionamiento se basa en inyectar una sustancia que reaccione químicamente con el gas contaminante y el compuesto químico formado sea un gas nocivo o un sólido que precipita en un recipiente habilitado para ello. Esta medida es muy utilizada ya que es muy complicado y costoso reducir las emisiones de los óxidos de azufre utilizando medias primarias, al contrario de lo que se hace con los óxidos de nitrógeno.



- **Proyectos en investigación**

ENSPIRIT es un proyecto financiado por la UE que está desarrollando un innovador sistema de reducción de las emisiones para reducir la contaminación y cumplir con la nueva y estricta normativa sobre la materia en partículas (MP).

En 2008, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos adoptó normas que deberían reducir drásticamente el óxido de nitrógeno (NO_x) y las emisiones de MP de las locomotoras. Esas normas se basan en la aplicación de tecnología de alta eficiencia de post-tratamiento catalítico para motores recientes, construidos en 2015 y en adelante.

Aunque la reducción catalítica selectiva es una tecnología bien establecida de post-tratamiento, no puede convertir efectivamente el óxido nítrico (NO) a temperatura ambiente y en concentraciones bajas. El proyecto financiado por la UE ENSPIRIT (Elimination of NO_x, SO_x and particulates in rail transportation) está trabajando en un dispositivo catalítico oxidativo avanzado que permite convertir NO en dióxido de nitrógeno a temperatura ambiente sin usar amoníaco.

ENSPIRIT también creará un aparato de irradiación de microondas in situ para optimizar la desorción de contaminantes a partir de catalizadores de carbono. El sistema se basa en el uso de carbón activado (AC), dado que es un excelente absorbente de microondas.

En última instancia, el dispositivo catalítico se integrará en un sistema de dispositivos combinados para eliminar calor, humedad, óxidos de azufre, MP ultrafinas y NO_x. Esto debería proporcionar una

manera completa, rentable y eficiente de satisfacer las nuevas normas de emisiones de nivel 4 de la EPA para los trenes diésel, nuevos o antiguos, a partir de 2015.

Hasta el momento, el equipo del proyecto ha realizado una importante labor en relación con el diseño de un reactor de oxidación catalítica a baja temperatura. Se llevó a cabo una investigación preliminar sobre oxidación de NO a baja temperatura con AC en diferentes condiciones del reactor (temperatura, caudales, cantidad de catalizador).

En cuanto al reactor catalítico de microondas, el equipo ha preparado con éxito los materiales catalizadores y desarrollado un método para identificar los cambios en el área de la superficie del AC. Se ha iniciado la fabricación de los componentes del sistema de regeneración.

El NO_x y la MP de las locomotoras diésel tienen un impacto negativo en la salud humana y el medio ambiente. El innovador sistema de reducción de las emisiones de este proyecto reducirá en un 75% las emisiones de NO_x de las locomotoras diésel de todo tipo (de transporte de carga, intercambio y de pasajeros).

Se ha estimado que el sistema ENSPIRIT llegue a alcanzar un precio de venta de 448000€.

5.5 Implementación de esta tecnología a un caso concreto

A la hora de implementarlo en una serie de locomotoras, lo que hay que preguntarse es, ¿cómo alcanzamos el cumplimiento de la normativa minimizando los costes?

Para ello, los criterios de diseño tienen que ser minimizar el impacto medioambiental, los costes (fabricación, instalación, mantenimiento/repación, monitorización, ...), todo ello manteniendo la potencia de la locomotora y siempre enfocado a cumplir con las limitaciones impuestas en la normativa más actual.

La propuesta de ciertos fabricantes, como puede ser el caso de Caterpillar, es la de reconvertir el motor que ya se tiene a otro que cumpla con la normativa vigente.

Esto se consigue equipando el motor con sistemas avanzados de post-tratamiento para los gases de escape que incluye urea, tecnología basada en la de reducción catalítica selectiva (SCR), así como la tecnología del catalizador de oxidación diésel (DOC).

Post-Tratamiento

El sistema de post-tratamiento consiste en tres componentes principales: el depósito de DEF (Diesel Exhaust Fluid), el armario de dosificación y el reactor.

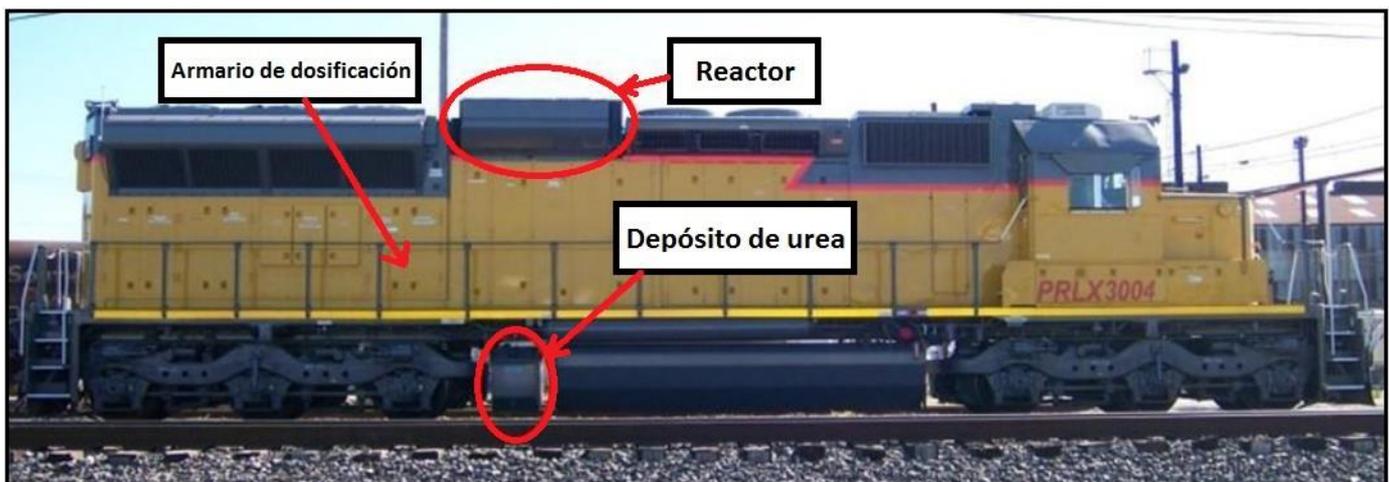


Figura 4 – Localización de los componentes del sistema de post-tratamiento

La figura 4 muestra la ubicación de estos componentes en la locomotora. DEF es una solución acuosa con un 32,5% en peso de urea y es el agente de reducción de NO_x utilizado en el sistema de post-tratamiento.

El reactor se adapta a la locomotora en cuestión de tal forma que la salida de los gases de escape entren en el reactor y se dirijan a través de los elementos DOC. La corriente de los gases de escape se redireccionan al centro del reactor. La DEF se inyecta en el centro de la corriente de los gases de escape a través de un inyector de aire asistido. El sistema de control SCR utiliza al menos 2 sensores de NO_x : uno colocado justo aguas arriba del inyector DEF para medir la cantidad de NO_x a la entrada y el otro u otros a la salida para medir la cantidad de NO_x a la salida del banco de SCR.

El armario de dosificación, contiene el controlador SCR, bomba dosificadora del DEF y el DEF. Estos componentes suministran y controlan el flujo del DEF y el aire comprimido para el inyector del DEF.

El proceso de instalación está estimado en aproximadamente 1 semana y consiste en las siguientes tareas:

- Montaje del reactor de post-tratamiento sobre el motor,.
- Instalación de instrumentación y cableado para el control del sistema SCR y comunicaciones de red.
- Instalación del inyector del DEF y aire comprimido y reestructuración de la ventilación del cárter para la salida de los gases de escape tras el SCR.

El controlador SCR está programado para inyectar DEF sólo cuando las temperaturas de escape son suficientes para la descomposición total de la urea dentro del tubo de mezcla del SCR. Con este sistema se pueden llegar a registrar reducciones en el flujo de masa de NO_x de al menos el 85 por ciento.

El DOC es eficaz reduciendo de la parte orgánica soluble del material particulado, que consta de hidrocarburos quemados y aceite lubricante. Por lo tanto, el impacto relativo de un DOC sobre el material particulado está limitado, generalmente, por la cantidad de esa parte orgánica soluble del material particulado presente en los gases de escape del motor.

El índice de inyección del DEF es proporcional al flujo de los NO_x en el motor dentro del SCR y por lo tanto puede verse afectada indirectamente por los parámetros que típicamente los NO_x en el motor conllevan, como la humedad del aire de admisión. El aumento en el índice de inyección del DEF entre tramos puede atribuirse a reducir progresivamente los niveles de la humedad del aire de admisión para cada serie y el correspondiente incremento en el flujo de NO_x en el motor.

Otro proyecto llevado a cabo por General Electric es utilizar una nueva generación de locomotoras utilizando un filtro de partículas diésel (Diesel Particulate Filter) y un SCR (Selective Catalytic Reduction). Este proyecto se está desarrollando en la ciudad de Tampa (EEUU).

Se han planteado como misión encontrar una solución rentable que reduzca la contaminación y hacer que el sistema de transporte cumpla con la normativa Tier 4 de la EPA los alcance, manteniendo e incluso aumentando de la capacidad de carga en Tampa Bay.

Han realizado un análisis de costes y beneficios para ver la viabilidad de este proyecto y estos son sus resultados:

- Añadir un filtro de partículas diésel (Diesel Particulate Filter) y un SCR (Selective Catalytic Reduction) a una locomotora supone 704.000 dólares por tren. Comparándolo con otras de sus soluciones, esto es 1 millón de dólares más barato que utilizar una locomotora híbrida diésel-eléctrica (locomotora que almacena en baterías la energía disipada durante el freno dinámico) y 1,8 millones de dólares más barato que utilizar las nuevas locomotoras General Electric tier 4.
- La capacidad de la carga se mantiene constante, mientras que el aumento de la eficiencia del combustible se incrementa en un 3,5%.
- Reduce las emisiones de NO_x en un 75-90% y las de partículas en un 50-90% por lo que proporciona beneficios significativos para la salud de los residentes de Tampa y cerca de Tampa.
- Otros beneficios:
 - Aumenta la esperanza de vida.
 - Disminuye las primas de seguros.

-
- Reduce el efecto invernadero.
 - Podría prevenir el impuesto sobre el carbono si Naciones Unidas lo impone en el futuro.

6 Conclusiones

Este trabajo surgió de la idea de que es posible tener un modo de transporte más limpio en nuestras ciudades si se hace uso de las mejoras tecnológicas.

La conclusión principal es que sí es posible tener un modo de transporte más amigable con el medio ambiente. Pero por los estudios que se han llevado a cabo, lo primero que se desprende de ellos es que sí se quiere cumplir con las normativas medioambientales o si simplemente tener un aire más limpio del que poder respirar, hay que realizar un desembolso económico muy importante, de menor cuantía si lo que se lleva a cabo es una renovación en la que sólo se añade al motor diésel de los sistemas necesarios para el post-tratamiento de los gases de escape.

Otra idea que se desprende tras la realización de este trabajo es que todas estas innovaciones tecnológicas no se habrían desarrollado si no fuese porque cada vez la normativa medioambiental es más estricta en cuanto a emisiones de contaminantes se refiere y porque cada vez hay una mayor concienciación sobre los efectos nocivos de esas emisiones y de cómo nos afectan a nosotros, a nuestra salud y al medio ambiente que nos rodea.

Por otra parte, un beneficio económico secundario que se produciría sería en el sector de la sanidad, ya que al reducir la emisión de contaminantes a la atmósfera, el aire sería de mayor calidad y el gasto médico asociado a cada habitante que por una exposición continuada o prolongada a un ambiente cargado con muchas partículas en suspensión, y que se ha demostrado que perjudican la salud, se reduciría drásticamente.

7 Aportaciones

Como indica el título de este trabajo, el resultado final buscado es la realización de un estudio sobre las distintas alternativas y sistemas que se están investigando, desarrollando e implementando en las locomotoras diésel y que llegado el momento cumplan con la normativa medioambiental vigente.

Este trabajo aporta una visión global de cada uno de los sistemas que se pueden añadir a un motor diésel para reducir la cantidad de emisiones contaminantes a la atmósfera y también, una mirada hacia lo que están haciendo en otros sectores como el automovilístico, en donde los camiones ya usan desde hace tiempo este tipo de tecnologías.

Desde el punto de vista económico, hoy por hoy es más ventajoso para los operadores, tanto públicos como privados, el modificar su flota de locomotoras diésel añadiendo al motor diésel del que ya disponen el sistema que más se ajuste o puedan incorporar por cuestiones de técnicas, de diseño, operabilidad, rendimientos, mantenimiento, etc.