

La emisión de aerosoles de partículas y gases en motores de diésel

Manuel Bernaola Alonso

Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. INSHT

Las partículas que emiten los escapes de motores diésel son de naturaleza y toxicidad muy diferente y están presentes compuestos reconocidos como cancerígenos. Las partículas de carbón que contienen son de diámetro inferior a 0,1 μm y adsorben en su superficie otros hidrocarburos que forman parte de los líquidos condensados e incluso sulfatos por el contenido de azufre del combustible. Con todo y después de la aglomeración no se llegan a alcanzar diámetros superiores a los 0,8 μm , es decir, ultra finas y respirables. El IARC, que forma parte de la Organización Mundial de la Salud (OMS), ha clasificado en 2012 el escape de los motores de diésel como cancerígeno para humanos (categoría 1), basado en una evidencia suficiente de que la exposición está asociada a un aumento de riesgo de cáncer de pulmón. En 1988 ya se clasificó como probable cancerígeno en humanos (grupo 2A).

1. Introducción

Los motores térmicos pueden ser de encendido controlado o de diésel si la temperatura del aire comprimido en el cilindro provoca auto-inflamación de la mezcla al inyectar el carburante. En el transporte por carretera es frecuente el empleo del motor diésel. En espacios confinados no se utiliza ni gasolina ni gas licuado de petróleo por su inflamabilidad y el riesgo de incendio o explosión.

La contaminación que generan los motores diésel en espacios confinados es tal que 1 Kg de gasoil (algo más de un litro) requiere unos 15 Kg de aire y produce unos 14 m³ de gases de los que

una parte son tóxicos. Además, si el lugar no está bien ventilado, la falta de oxígeno puede causar más CO de lo habitual como consecuencia de una combustión deficiente. Para reducir los efectos adversos hay que intervenir sobre el diseño de los motores, el tratamiento de los gases en la salida y mediante la ventilación.

Los medios de locomoción producen solo un 5% de las emisiones de SO₂ al ambiente, un 25% de CO₂, un 87% de CO y un 66% de NO_x. El esquema 1 refleja la composición de los gases de escape y muestra que el nitrógeno del aire no sufre modificación, salvo una pequeña cantidad que se transforma en NO_x. Además, se emiten CO, hidrocarburos y

partículas de hollín en una fracción muy pequeña del total de los gases emitidos. Por lo tanto, los gases del escape no contribuyen en gran medida a una contaminación global de la atmósfera.

Si se comparan las emisiones de escape del motor de gasolina con el de diésel convencional, se comprueba que este último, sin depuración de gases, alcanza valores más bajos de hidrocarburos (HC) y CO mientras que la emisión de gases nitrosos es similar aunque hay una tendencia a aumentar en el de gasolina con los años de uso. En cambio, el motor diésel produce mayor cantidad de partículas (hollín) formando un aglomerado de carbono al que se adhieren

HC, agua, sulfatos, azufre y óxidos metálicos.

No hay un método de toma de muestras y análisis químico que se ajuste al estudio del total de partículas en estos aerosoles y, por lo tanto, en la evaluación de la exposición por inhalación hay riesgo de, según los casos, infravalorar o sobrevalorar el resultado de la medición.

Cuanto más pequeño es el tamaño de las partículas, más difícil es su separación de las inerciales y del propio aire. Esto significa que la contaminación no solo se reduce al entorno del trabajo sino que se extiende al resto de las instalaciones. De ahí la importancia de ejercer un control en la fuente de la emisión.

Las normas europeas, denominadas genéricamente "EU x" marcan a la industria del automóvil los límites de emisión de contaminantes para la homologación de los nuevos modelos. Con el cumplimiento de la normativa se ha reducido y se seguirá reduciendo la emisión de los gases de escape. La emisión de CO₂ es una excepción, incluso con la aplicación de las nuevas tecnologías, al elevarse el consumo de combustible por el aumento del parque automovilístico y el diseño de vehículos cada vez más potentes.

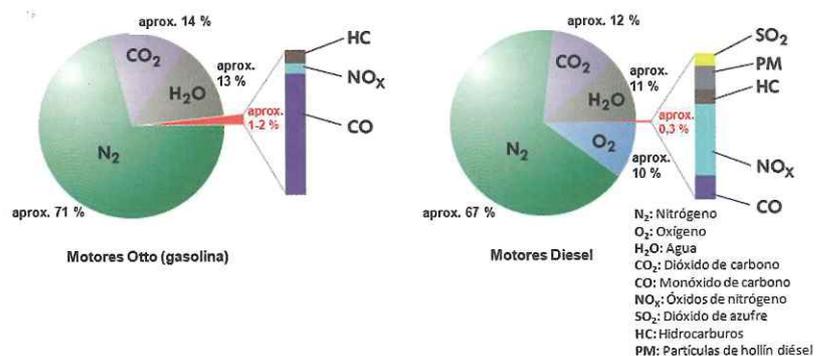
El desarrollo de sistemas electrónicos de control del motor hace posible una inyección exacta de la cantidad de combustible y un ajuste preciso del punto de encendido. Además, se ha conseguido aumentar la potencia y mejorar la emisión del escape.

2. Los contaminantes atmosféricos

Se considera contaminante de la atmósfera a toda sustancia ajena a su composición normal que se incorpora y



Esquema 1 Composición de los gases de escape



permanece en ella durante un tiempo. En esta categoría también se incluyen las sustancias que conforman la atmósfera y que se presentan en concentraciones superiores a las naturales.

La contaminación atmosférica no siempre tiene un origen antropogénico, aunque en contaminación se hace referencia a este, ya que también pueden provocarla acciones naturales como las erupciones volcánicas y las tempestades de arena.

Son muchas las fuentes que contribuyen a la presencia de materia particulada en la atmósfera (incendios forestales, erupciones volcánicas, vientos, brumas marinas, pólenes de las plantas y la ac-

tividad humana, en especial, el tráfico rodado y las grandes centrales térmicas).

Los contaminantes del aire se pueden clasificar según criterios distintos: estado, toxicidad, reactividad, etc... Por la composición química, los más importantes son:

- Partículas, que según tamaño son: sedimentables (> 30 µm), en suspensión (< 30 µm), respirables (< 10 µm) o humos (< 1 µm).
- Compuestos de azufre: SO₂, H₂S, H₂SO₄, mercaptanos o sulfuros.
- Compuestos de nitrógeno: NO, NO₂, NO_x o NH₃.
- Compuestos de carbono: CO, CO₂, CH₄ o hidrocarburos (HC).

- Halógenos y compuestos halogenados: Cl₂, HCl, HF o clorofluorocarbonos (CFC).
- Oxidantes fotoquímicos: O₃, peróxidos o aldehídos.

La forma más habitual de clasificación se hace considerando su procedencia:

- **Primarios:** proceden directamente de las fuentes de emisión.
- **Secundarios:** se originan en la atmósfera como consecuencia de reacciones químicas que sufren los contaminantes primarios.

Los principales contaminantes primarios gaseosos son:

- Dióxido de Azufre (SO₂)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Óxidos de Nitrógeno (NO_x)
- Hidrocarburos (HC)
- Dióxido de Carbono (CO₂)

Entre los primarios no gaseosos están:

- Partículas: de procedencia y composición muy variada (procesos de combustión de fuel o gasoil y alquitranes, polvo del suelo, erupciones volcánicas, incendios, incineraciones no depuradas de basuras, etc.).
- Metales pesados (plomo, cadmio, mercurio).

Las principales alteraciones atmosféricas que generan los **contaminantes secundarios** son:

- Contaminación fotoquímica (smog fotoquímico) por la aparición de oxidantes en la atmósfera al reaccionar entre sí los óxidos de nitrógeno (NO_x), los hidrocarburos (HC) y el oxígeno (O₂) en presencia de los rayos solares, y está favorecida con situaciones anti-

clónicas (fuerte sol y poco viento) que dificultan la dispersión de los contaminantes primarios.

- Ozono troposférico (O₃) como el más característico de los contaminantes de origen fotoquímico producido por la acción de la radiación solar al incidir sobre las capas bajas de la atmósfera, en presencia de óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos (HC).

Se denomina **PM₁₀** a la materia particulada respirable o fracción de polvo de diámetro aerodinámico menor a 10 µm y capaz de alcanzar el sistema respiratorio. La fracción gruesa, con diámetro entre 2,5 y 10 µm en atmósfera urbana, está compuesta por polvo re-suspendido, como mezcla de partículas de origen natural o antropogénico. Se llama **PM_{2,5}** a la fracción más fina de diámetro inferior a 2,5 µm como partículas de origen antropogénico, ya sean emitidas en procesos de combustión (diésel, calderas y otros procesos industriales) o por reacciones de otros contaminantes gaseosos emitidos por vehículos a gasolina y otras fuentes. Estas partículas penetran hasta los alvéolos pulmonares e ingresan directamente al torrente sanguíneo.

La materia particulada (**PM**) en el aire está compuesta por las partículas primarias y las secundarias que se forman a partir de gases presentes en la atmósfera siendo los "precursores" el SO₂ (generado por la industria) y los NO_x (generados por las combustiones). Como las partículas secundarias son cerca del 50% del PM_{2,5} y el 25% del PM₁₀ es importante que en el control de los ecosistemas urbanos se consideren los gases citados.

Regulación de la emisión de contaminantes atmosféricos

El tráfico rodado, principalmente autobuses y camiones, y sus motores de

combustión interna son los responsables del polvo en re-suspensión (PM₁₀) y de las partículas de combustión (PM_{2,5}). Estos aerosoles, con una semana de vida media en la atmósfera, afectan a las plantas, la visibilidad, la radiación solar recibida y al nivel de las precipitaciones al interactuar con las nubes.

Al reflejar la luz del sol, pueden producir enfriamientos locales y temporales que compensarían, por poco tiempo, el calentamiento global provocado por los gases de efecto invernadero, pero por su corta vida en la atmósfera no lo hacen de forma permanente. Por lo tanto, en el proceso de cambio climático hay que tener en cuenta los gases de efecto invernadero (CO₂ y otros gases) y los aerosoles.

La legislación sobre contaminación atmosférica trata de preservar la calidad del aire, a fin de evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos potenciales que la presencia de ciertos compuestos pueda ocasionar en la salud humana y el medio ambiente. Así, la normativa establece los medios necesarios para:

- Limitar las emisiones a la atmósfera de agentes contaminantes
- Definir y establecer unos valores de referencia para los niveles de contaminación en el ambiente (niveles de inmisión).

La legislación comunitaria para protección del medio ambiente e incorporada a la legislación nacional establece, salvo excepciones, unos valores admisibles en el aire atmosférico muy inferiores a los dados como límites para ambientes laborales, lo que es lógico, dado que persiguen objetivos distintos. Solo para el ozono sus valores tienden a ser del mismo orden. A pesar de la dilución de los contaminantes en el aire, su control se ve con frecuen-

cia comprometido y, además, los niveles admisibles de algunos están en continua evolución.

La OMS ha realizado un estudio solicitado por la Comisión Europea como preparación de su nueva estrategia de calidad del aire y que aún no ha sido publicado. El informe recomienda modificaciones a la legislación vigente en la Unión Europea, en particular en relación con la concentración permisible de partículas en suspensión de menos de 2,5 micras de diámetro ($PM_{2,5}$) y de NO_2 . También recomienda establecer un límite de largo plazo para el ozono.

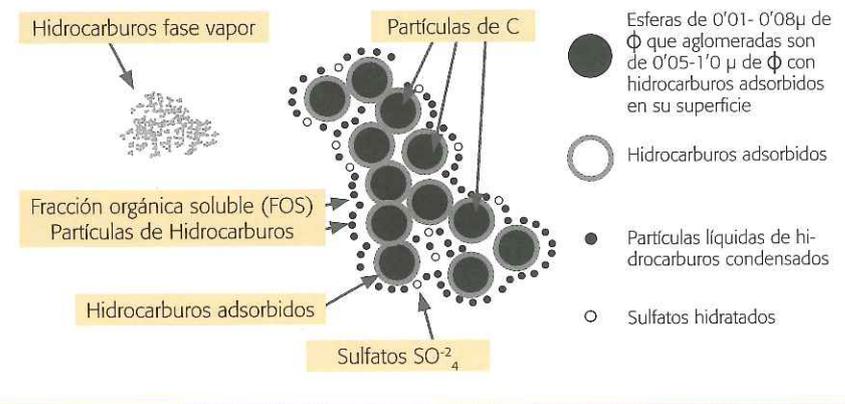
3. Los motores diésel

Los motores diésel transforman la energía química contenida en el combustible en fuerza mecánica. El combustible es inyectado bajo presión al cilindro del motor, donde se mezcla con aire y produce la combustión. Los gases del escape que descarga el motor contienen componentes que son nocivos para la salud humana y el medio ambiente.

Monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y aldehídos se generan por una combustión incompleta del combustible. Cierta cantidad de hidrocarburos proceden del lubricante del motor. Cuando la maquinaria y los equipos trabajan en recintos cerrados (minas subterráneas, edificios en construcción, túneles o talleres), el monóxido de carbono puede acumularse en el ambiente aunque los aldehídos e hidrocarburos son los que contribuyen al olor característico del diésel.

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) se generan al reaccionar el oxígeno y el nitrógeno del aire, por la presión y temperatura alcanzadas en el interior de cilindro del motor, y contienen óxido de nitrógeno (NO) y algo de dióxido de nitrógeno (NO_2).

Esquema 2 Composición de la materia particulada de diésel



El dióxido de azufre (SO_2) se genera a partir del azufre presente en el combustible. La oxidación del SO_2 produce trióxido de azufre, precursor del ácido sulfúrico, responsable de las partículas de sulfato en las emisiones diésel.

La emisión del escape del motor diésel es una mezcla compleja de gases, vapores y de materia particulada de diésel (DPM en inglés) como agregado de material sólido y líquido cuyo origen son partículas de carbono generadas durante la combustión en el cilindro del motor y está compuesta de:

- Sólidos o partículas de carbón seco ($PM_{0,1}$), conocido como hollín.
- Hidrocarburos pesados adsorbidos y condensados en las partículas de carbón, como fracción orgánica soluble (FOS).
- Sulfatos (SO_4^{2-}), ácido sulfúrico hidratado.

En esta situación, se ha empezado a prestar especial atención a las partículas sólidas de carbono no quemado, que atraen y adsorben en su superficie los hidrocarburos de mayor peso molecular y al tiempo sirven de vehículo para otros en fase líquida e incluso para los sulfatos que pudieran formarse. Estas pequeñas partículas, que se aglomeran entre sí formando otras de mayor tamaño (0,04 y 1 μ),

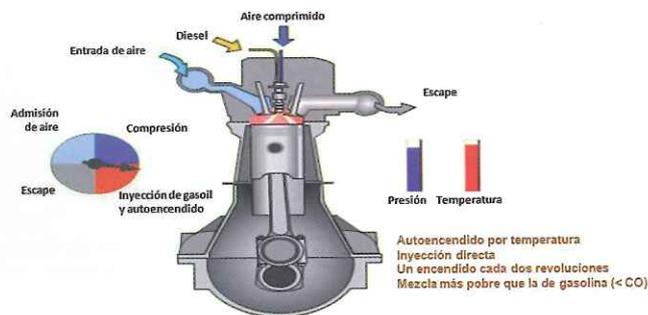
permanecen en suspensión en los gases de escape y constituyen un aerosol que puede alcanzar los alvéolos pulmonares. El pequeño tamaño de estas partículas no facilita su sedimentación por lo que, de no captarlas en el origen, se extenderán a otras zonas de trabajo (esquema 2).

La composición dependerá del motor, la carga y la velocidad. Las partículas "húmedas" pueden contener hasta un 60% de hidrocarburos (FOS) y las partículas "secas" son en su mayoría carbón seco. La partícula principal de carbono (núcleo) tiene un diámetro de 0,01 - 0,08 μ y aglomeradas están en el rango respirable de 0,08-1 μ . Los hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH), muchos reconocidos como cancerígenos para el hombre, están presentes tanto en la fase gaseosa como en la particulada y los más pesados, en la fracción orgánica soluble (FOS).

Las emisiones de los motores de combustión interna pueden contener, además, metales pesados y sus compuestos (arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, selenio y cinc), formaldehído, benceno, sulfuro de hidrogeno, 1,3 butadieno, además de los ya mencionados SO_x , NO_x , CO y CO_2 .

La reacción teórica de combustión de un gasóleo en un motor de combustión interna implica una estequiometría teórica aire/diésel de 14,7/1. En la práctica, si

■ Figura 1 ■ Motor de gasoil de 4T y sus características



un motor trabajase en estas condiciones, una mezcla de combustible /carburante que dista de ser perfecta aumentaría mucho el contenido de monóxido de carbono (CO), hollín y, en general, los inquemados de los gases de escape. Así, los motores térmicos trabajan con relaciones 20/1 o 25/1 con el motor en carga y de 100/1 en vacío. Un exceso de aire puede ser la causa de la generación de otros productos de oxidación en los humos de escape, también tóxicos, como son los óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), de azufre (SO₂ y SO₃) y los aldehídos.

El contenido de gases tóxicos del escape depende sobre todo del tipo de motor utilizado y de su estado de conservación. Tradicionalmente, hasta principios de los años 90, se consideró que el motor más adecuado para trabajos subterráneos de-

bía tener, entre otras, las características siguientes:

- Diésel (figura 1)
- De cuatro tiempos
- De aspiración natural y no turboalimentado
- Con pre-cámara de combustión
- Algo sobre dimensionado

Siempre se consideró que el motor diésel contaminaba menos que el de gasolina al utilizar una mezcla combustible más pobre por lo que se reduce el contenido de CO e hidrocarburos en los gases de escape. Lo mismo ocurre con el motor de cuatro tiempos respecto del de dos.

Por otra parte, el motor turboalimentado trabajaría a una temperatura más alta, lo que favorecería la formación de NO_x. La pre-cámara de combustión es un diseño especial del cilindro (figura 2) que permite:

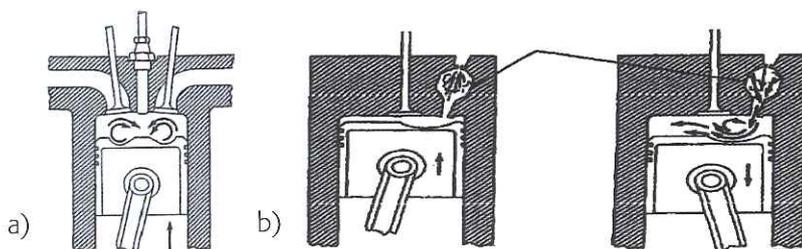
- menor presión de inyección del gasoil y mejor mezcla con el aire, lo que supone menor contenido de CO en los humos;
- que la combustión se haga en dos etapas: la primera, con solo la mitad de aire disponible, y la segunda, a una temperatura relativamente baja, lo que limita la formación de NO_x.

En la actualidad y gracias al encendido electrónico de inyección directa, estos motores son más limpios aunque menos que los de gasolina. En líneas generales, los hidrocarburos del gasóleo son más pesados (C14-C19) que los de la gasolina y en el escape hay más partículas sólidas. También generan óxidos de nitrógeno, que a su vez producen más hollín (partículas finas).

Como norma general y en resumen se puede decir lo siguiente:

- Los diésel producen menos CO e hidrocarburos inquemados pero más NO_x que los de gasolina o de gas. Emiten más SO₂ por el contenido de azufre del carburante que los de encendido controlado.
- Los de gases licuados del petróleo (GLP), si están ajustados, generan menos CO e hidrocarburos que los diésel a igualdad de carga, y mucho menos que los de gasolina.
- Los diésel emiten de 10 a 20 veces más partículas que los de gasolina y aún más que los motores de GLP.

■ Figura 2 ■ a) Inyección directa; b) Pre cámara de combustión



En la carrera de compresión, el aire se comprime en la pre-cámara, alcanzando altas temperaturas, iniciándose la combustión en la inyección. La presión enorme que crean los gases generados lanza al fuel precalentado a la cámara principal a gran velocidad. La forma cóncava de la cabeza del pistón crea unas turbulencias que favorecen la combustión completa en una segunda etapa.

Las partículas del diésel están compuestas de carbono y cenizas, compuestos orgánicos y partículas de sulfato. La mayoría de los compuestos orgánicos se adsorben sobre las partículas de carbono y provienen del carburante y los lubricantes y su composición varía según el carburante y la forma de trabajo del motor y pueden estar presentes PAH y dioxinas. Las partículas más finas que apenas representan el 1% en masa son del orden del 90% en número; y del 50% al 80% de la masa lo aportan las partículas de 0,02 a 0,5 μ . Los parámetros que influyen en la composición de los gases son:

- Tipo de motor y forma de la inyección.
- Si el motor está regularmente mantenido y revisado.
- Régimen del motor (ralentí, aceleración o desaceleración, transitorio, marcha estabilizada o de crucero, plena carga).
- Tipo de carburante.

Tabla 1 ■ Valores máximos recomendados para motores de encendido controlado

Potencia (kW)	Fecha aplicación	CO (g/kWh)	Hidrocarburos (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	Partículas (g/kWh)
Etapa I					
130-560	1999	5,0	1,3	9,2	0,54
75-130	1999	5,0	1,3	9,2	0,70
37-75	1999	6,5	1,3	9,2	0,85
Etapa II					
130-560	2002	3,5	1,0	6,0	0,2
75-130	2003	5,0	1,0	6,0	0,3
37-75	2004	5,0	1,3	7,0	0,4
18-37	2001	5,5	1,5	8,0	0,8

- Si se dispone o no de un sistema de descontaminación.

Regulación de las emisiones de motores de diésel

Las regulaciones de las emisiones y de calidad del aire son de dos tipos:

- Regulación de emisiones medidas en la "cola del escape".
- Calidad estándar del aire ambiental.

Los motores diésel de carretera y algunos de uso fuera de ella están sujetos a

las regulaciones de la emisión en la "cola del escape" que establecen los niveles permitidos, medidos en un ciclo de pruebas del motor, de forma que los equipos tengan sus certificados de emisión antes de la venta. Las emisiones de los motores diésel para recintos cerrados se regulan por normas de calidad del aire.

La reglamentación europea regula las emisiones de los motores de forma diferente para coches ligeros, vehículos de gran tonelaje y otros de transporte, con una normativa avanzada, o para los vehículos no destinados a la carretera. Este último grupo incluye: maquinaria para

Tabla 2 ■ Valores máximos según Directiva

Potencia (kW)	Fecha aplicación	CO (g/kWh)	NO _x + Hidrocarburos (g/kWh)	Hidrocarburos (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	Partículas (g/kWh)
Etapa IIIA						
130-560	2005	3,5	4,0			0,20
75-130	2006	5,0	4,0			0,30
37-75	2007	5,0	4,7			0,40
19-37	2006	5,5	7,5			0,60
Etapa IIIB						
130-560	2010	3,5		0,19	2,0	0,02
75-130	2011	5,0		0,19	3,3	0,02
37-75	2011	5,0		0,19	3,3	0,02
19-37	2012	5,0	4,7			0,025
Etapa IV						
130-560	2013	3,5		0,19	0,4	0,025
56-130	2014	5,0		0,19	0,4	0,025

Tabla 3 ■ Valores máximos para vehículos de carretera con motor diésel

Fecha y categoría	Ensayo	CO (g/kWh)	Hidrocarburos (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	Partículas (g/kWh)	Opacidad de humos (m ⁻¹)
Euro I 1992	ECE R-49	4,5	1,1	8,0	0,612	
Euro I 1992	ECE R-49	4,5	1,1	8,0	0,36	
Euro II 1996	ECE R-49	4,0	1,1	7,0	0,25	
Euro II 1998	ECE R-49	4,0	1,1	7,0	0,15	
Euro III 1999	ESC y ELR	1,5	0,25	2,0	0,02	0,15
Euro III 2000	ESC y ELR	2,1	0,66	5,0	0,10	0,80
Euro IV 2005	ESC y ELR	1,5	0,46	3,5	0,02	0,50
Euro V 2008	ESC y ELR	1,5	0,46	2,0	0,02	0,50

perforación de pozos industriales, compresores, equipos de cantera, maquinaria de construcción de carreteras, carretillas elevadoras, máquinas quitanieves, grúas móviles, equipos de asistencia aeroportuaria, etc. No se aplica a barcos, locomotoras de ferrocarril, aeronaves y grupos electrógenos. Para motores de encendido controlado desde 19 kW hasta 560 kW, los valores máximos recomendados se dan en la tabla 1 (etapas I y II).

La Directiva 2004/26/CE, más exigente, modificó la anterior, aproximándose a las condiciones reales de utilización. Los valores máximos están reflejados en la tabla 2 (etapas IIIA, IIIB y IV). Los límites de la etapa IIIA consideraban un contenido en azufre del carburante de 1000 a 2000 ppm y para la etapa IIIB, si era menor de 50 ppm. A partir de 2008, el contenido de azufre no debe superar las 1000 ppm y tan solo 50 ppm para vehículos de carretera de diésel o gasolina, aunque haya carburantes con menos de 10 ppm.

La tabla 3 da los valores máximos para vehículos diésel de carretera.

La prueba de ciclo estacionario ECE R-49 fue sustituida con Euro III por otras dos: una de ciclo estacionario ESC y otra de ciclo transitorio ETC, además de un ensayo de opacidad de humos (ELR). Para Euro III los fabricantes podían pasar el test ESC o el ETC pero con Euro IV y V es preceptivo pasar los dos y los límites de emisión, según uno u otro, son diferentes.

4. La emisión de gases de motores diésel en ambientes laborales

Los motores de diésel se emplean por su autonomía y gran capacidad de trabajo en maquinaria para mantenimiento o transporte, excavadoras y para extracción de material, hormigoneras, perforadoras, de fuerte tracción, en la transformación de energía y para uso industrial y obras públicas. El problema se agrava si las actividades se realizan en espacios cerrados y pobremente ventilados (locales, almacenes, depósitos, excavaciones, zanjas, pozos, galerías, cabinas de peaje, parques de estacionamiento y subterráneos).

En general, las emisiones de los motores de diésel son mucho más visibles que las de los motores de gasolina, ya que contienen más hollín o materia particulada, con menos CO pero más NO_x, SO₂ o aldehídos.

Las partículas de hollín que pueden alcanzar hasta un 60-80 % del total emitido contienen sustancias orgánicas adsorbidas en su superficie y variará según el combustible utilizado, tipo de motor y grado de mantenimiento.

Durante el funcionamiento del motor se pueden distinguir tres tipos de humos visibles:

a) Humo azulado (aceite y fuel no quemado), en motores que queman mal

por su mal uso o mal estado de conservación.

b) Humo negro (hollín, aceite y carburante no quemado) si hay fallo mecánico en el motor (defecto en el sistema de liberación de fuel o porque trabaja a máxima potencia).

c) Humo blanco (gotas de agua y carburante no quemado) debido al arranque en frío del motor, que desaparece cuando se atempera. La cantidad producida es independiente del grado de mantenimiento y, cuando se trata de motores viejos, produce un olor desagradable.

En el ambiente laboral, los trabajadores pueden inhalar partículas ultrafinas respirables por el uso de maquinaria y vehículos, en interiores o exteriores (galerías, la propia cabina o en talleres y fábricas), y según el tipo de actividad, si está relacionada con el control de tráfico y la contaminación ambiental.

Efectos para la salud

Los efectos adversos para la salud más conocidos son:

a) Irritación ocular y respiratoria, en especial si el nivel de emisión es elevado.

b) La exposición prolongada a los humos pueden causar tos, flemas y dificultad respiratoria.

- c) Hay evidencia epidemiológica de que existe un ligero aumento del riesgo de cáncer de pulmón, por contener alguna sustancia carcinógena (PAH) y que son fácilmente inhalables

Carcinogenicidad

A partir de los principales componentes de la emisión de diésel (CO, formaldehído y óxidos de nitrógeno NO_x) no es posible relacionarlos con los cancerígenos de la clase 1 o 2 y, por lo tanto, tal normativa no es aplicable.

No obstante, a nivel internacional existe una creciente preocupación por el carácter cancerígeno de esas emisiones y los prolongados tiempos de exposición en ciertas actividades laborales, como los trabajos en minas subterráneas. Por el riesgo de cáncer detectado y las manifestaciones de los trabajadores respecto a los efectos de irritación respiratoria, sería conveniente profundizar para establecer un valor límite de exposición ajustado a la realidad (por ejemplo, considerar un efecto nocivo por inhalación sinérgico potenciador de todos sus componentes).



Efectos alérgicos e inmunológicos

Las partículas de diésel parece que intervienen en los mecanismos alérgicos potenciando las respuestas de los alérgenos. Esto explicaría una respuesta inflamatoria al penetrar en los pulmones los alérgenos adsorbidos en la materia particulada, hecho que parece demostrado tanto a nivel humano o animal como en los modelos celulares.

También se sugieren, según diversos estudios, posibles efectos cardiovasculares así como sobre la reproducción y el desarrollo.

5. Límites de exposición profesional

En 1988, NIOSH publicó un informe indicando que la emisión diésel era sospechosa de ser carcinógena, de la misma opinión que EPA. Canadá, en los años 90, sugirió que la evaluación de la exposición mediante la medición de polvo combustible respirable (PCR) debería valorarse frente a un valor límite de 1,5 mg/m³ para una jornada de 8 horas.

Por otro lado, en 1996, la ACGIH en EEUU propuso un TLV-TWA para carbono total (CT) de 0,15 mg/m³ y dos años después lo rebajó a 0,05 mg/m³. En 2001 consideró el carbono elemental (CE) y propuso un valor de 0,02 mg/m³, estimando que era el 40% de la masa total particulada, y que retiró al año siguiente.

En 2001, la Mine Safety and Health Administration (MSHA), encargada de vigilar la seguridad y salud en las minas americanas, estableció un límite para el CT en minas de 0,400 mg/m³, sin considerar cenizas inorgánicas ni sulfatos, y cinco años después lo rebajó a 0,160 mg/m³, aplicando el método NIOSH 5040 como procedimiento de toma de muestras y análisis químico. Para referirlo a CE empleó un factor de conversión (CT) / (CE) = 1,3. El empleo del CE tiene la ventaja de no considerar otras fuentes diferentes al diésel, como por ejemplo el carbono orgánico (CO) procedente del aceite.

En Europa, en concreto en Alemania, Austria y Francia, hay un valor límite para este contaminante desde 2003. Los MAK alemanes establecen para la fracción alveolar los valores siguientes:

- Minas subterráneas (no de carbón): 0,30 mg/m³ de CE.
- Otros trabajos: 0,10 mg/m³ de CE o 0,15 de CT si la relación Carbono Orgánico (CO)/CE > 50%.

En un estudio de las condiciones ambientales de trabajo realizado en Francia sobre la emisión de diésel, se deduce que en trabajos subterráneos se llega a sobrepasar el valor límite alemán.

En España no hay un VLA que englobe el conjunto de los contaminantes que

Tabla 4 ■ Valores límite de exposición en España

Contaminante	VLA-ED	VLA-EC
CO	25 ppm	-
NO	25 ppm	-
NO ₂	3 ppm	5 ppm
Partículas diésel	-	-
Formaldehído	-	0,3 ppm
Acroleína	-	0,1 ppm

forman parte de la emisión de diésel ni tampoco hay un indicador representativo, como podría ser el carbono elemental al ser componente mayoritario. Por lo tanto, en la situación actual, se recurre al de partículas (insolubles o poco solubles) bien a los 10 mg/m³ para la fracción inhalable o a los 3 mg/m³ para fracción respirable en un modelo de exposición de 8 horas /día.

Para los gases, sí hay establecidos VLA, si bien la experiencia demuestra que en las condiciones de trabajo habituales las concentraciones están muy por debajo de sus respectivos valores límite, incluso en circunstancias puntuales adversas.

Los valores límite de exposición para los componentes de las emisiones del escape del diésel en España se reflejan en la tabla 4.

Con respecto al contacto del diésel con la piel, se recomienda emplear guantes de nitrilo y, si el fuel está caliente, el uso complementario de guantes para protección térmica, sustituyendo los interiores con cierta frecuencia para evitar la contaminación cutánea.

6. Evaluación del riesgo de exposición

Si puede haber exposición a emisiones de diésel, hay que analizar y evaluar:

Tabla 5 ■ Estimación del nivel de riesgo por emisiones de motores de diésel

Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Elevado
Humo no visible	A veces blanco, azul o negro	Siempre humo blanco, azul o negro
Sin depósito de hollín	Depósito visible en ciertas zonas	Fuerte depósito, sobre todo en zonas próximas a puntos de emisión
Sin referencias de irritación	Algún caso de irritación	Referencia de irritación generalizada
CO ₂ << 1000 ppm	CO ₂ del orden de 1000 ppm	CO ₂ >1000 ppm
Control correcto	No parecen eficaces los controles	Control inadecuado. Decidir la estrategia del control

- ¿A cuántas personas les puede afectar, en qué medida y cuánto tiempo?
- ¿Es posible evitar o controlar las emisiones?
- ¿Hay quejas del personal potencialmente expuesto?
- ¿Operan los motores a plena o media carga o en vacío?
- ¿En qué estado se encuentran los motores? ¿Puede mejorarse?
- ¿Las emisiones escapan al taller o se descargan por conductos al exterior? ¿Pueden disparar el sistema de detección de incendios?
- ¿Es visible la columna de humo en la zona de extracción? ¿Qué aspecto tiene el humo? ¿Se podría evitar?
- ¿Es visible la contaminación en la nave? ¿Es posible evitarlo y cómo?
- ¿Se han tomado las medidas de control técnico pertinentes? ¿Son eficaces y suficientes?
- ¿Hay un depósito visible de hollín sobre las superficies? ¿Se puede evitar? ¿Qué métodos de limpieza se emplean?
- ¿Cuántos motores diésel pueden estar funcionando al tiempo?
- ¿Es necesario el uso de motores diésel o hay alternativas?

La tabla 5 permite hacer, en una primera aproximación, una evaluación inicial del riesgo en función de ciertas observaciones.

En el caso de ser necesario hacer una evaluación específica de la exposi-

ción, habrá que recurrir a métodos más detallados.

7. Prevención y control de la exposición

A continuación se enumeran las medidas de prevención y de protección más adecuadas en estos casos.

A. Prevención

- Cambiar el método de trabajo.
- Modificar el diseño o disposición del taller.
- Modificar las operaciones para impedir la emisión de diésel.
- Sustituir el carburante por otro menos nocivo u otra tecnología alternativa (compresores a gas natural, vehículos a baterías).

Por ejemplo, la presencia de alcoholes en el combustible aumenta la cantidad de los aldehídos generados con un mayor riesgo de irritación respiratoria.

B. Control

Controles de ingeniería

- Motores más eficientes y de menor emisión (la inyección a presión reduce las partículas, los sistemas de recir-



culación de los gases de escape reducen la emisión de óxidos de gases).

- Carburante exento o de bajo contenido en azufre.
- Sistemas de ventilación por extracción localizada (VEL) con conducto flexible y aéreo conectado al escape del motor.
- Como el anterior pero con encerramiento parcial adaptado al escape.
- Sistemas de tratamiento de la emisión del escape del motor (convertidor catalítico por oxidación y trampas o filtros para retener partículas).
- Ventilación por dilución (natural o mecánica) y VEL en lugares apropiados.

La normativa nacional establece como exigencia única que el contenido de CO en el escape no supere las 1500 ppm de CO (ITC 04.5.04).

En la práctica, una recomendación establece que el caudal de extracción del aire interior para diluir los gases de escape ha de ser como mínimo de unos 5-10 m³/s por cada 100 HP de potencia diésel en funcionamiento. Otra regla equivalente es la que aconseja unos 700-1000 m³ de aire por litro de gasoil consumido.

Control por organización del trabajo

- Usar procesos o formas de trabajo que reduzcan la emisión (parar los motores mientras su empleo no sea necesario, programa de revisión y mantenimiento de los equipos).
- Reducir al máximo el número de trabajadores expuestos.

Equipos de protección individual respiratoria

- Mascarillas de protección respiratoria frente a gases y DPM.

Merecen una atención especial, por la necesidad de adoptar medidas específicas de control, ciertas situaciones o locales, tales como:

- Garajes y talleres de pruebas.
- Garajes para autobuses.
- Instalaciones de almacenamiento y depósito.
- Vías y estaciones de ferrocarril, reparación y mantenimiento de vagones y máquinas de tren, túneles, etc.
- Camiones de transporte y reparto.
- Cabinas de peaje y aparcamientos de vehículos.

- Parques de bomberos.
- Incineradoras de residuos.

8. ¿Qué se hace en tecnología diésel para reducir las emisiones?

Para reducir la contaminación que producen estos motores se ha intentado:

- Desarrollar nuevos modelos menos contaminantes
- Mejorar los sistemas de depuración en el escape
- Utilizar combustibles más limpios, usando, a veces, ciertos aditivos.

Respecto al diseño de motores, el esfuerzo se centra en la optimización de la combustión, de los sistemas de inyección y en minimizar el consumo de aceite. Con componentes electrónicos y los correspondientes sensores se dispone de la información necesaria sobre los parámetros básicos de funcionamiento (velocidad de giro, potencia, "par motor", momento en el que se produce la inyección, etc.). Todo ello redundará en un menor consumo de gasoil y una reducción de contaminantes en el escape. Parece ser que con los nuevos avances se consigue reducir hasta el 90% de la masa de partículas no quemadas respecto de los motores de hace 10 o 15 años, aunque, desgraciadamente, la mayoría de las que aún se generan son ultra-finas.

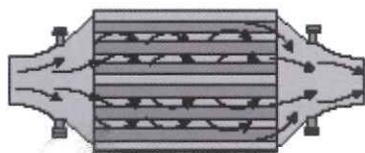
Otra medida adicional para reducir las emisiones sería limitar la cantidad máxima de inyección de gasoil por debajo de las especificaciones aunque implique una disminución de potencia.

La calidad del carburante se logra por filtración en varias etapas y remplaza-

■ Figura 3 ■ Purificador catalítico



■ Figura 4 ■ Filtro de partículas MPD



miento de pre-filtro y filtro. El azufre del carburante genera más partículas y el de los vehículos no destinados a carretera, al ser más económico (fuel doméstico), contiene más que los de carretera.

Por otro lado, el índice de cetano (hexadecano I.C. = 100) guarda relación con el de encendido (a mayor índice, menor retraso de la ignición y mejor es la calidad de combustión). La combustión es de calidad si hay una ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del carburante. En primera aproximación, se considera que el citado índice para diésel se comporta de forma inversa al de octano en las gasolinas: mejor si hay parafinas y peor con aromáticos y alcoholes.

Además, pueden contener algún aditivo para favorecer la combustión del hollín a baja temperatura y facilitar la regeneración de los filtros de partículas, pero no se deben utilizar sin estos ya que generan cenizas.

El biodiésel es un fuel oxigenado, sin azufre, que mezclado al 58%, aumenta el contenido de NO_2 y disminuye la materia

particulada. Tiene el inconveniente de ser caro. El diésel sintético sin azufre y bajo en aromáticos rebaja la tasa de emisión pero es caro y por el momento no viable

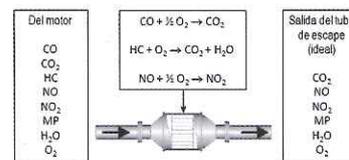
Los carburantes emulsionados con agua, usados en autobuses, generan menos partículas y gases nitrosos pero aumentan la fracción orgánica no quemada.

Sin entrar en detalle, el mantenimiento del motor debe contemplar:

- La admisión (filtro, turbocompresor, intercambiador de aire)
- El escape (control del nivel de emisión y la pérdida de carga)
- El sistema de inyección del diésel (regulación y nivel de presión de la bomba y de los inyectores así como el avance de la inyección)
- El sistema de refrigeración (el nivel de líquido refrigerante en el radiador, el grado de corrosión y el estado del termostato del ventilador)
- La calidad del diésel y su almacenamiento (estado y sustitución del filtro)
- El sistema de lubricación (calidad de los aceites y nivel en el motor)

Por otro lado, el tratamiento de los humos de escape tiene por objeto eliminar los gases tóxicos y retener las partículas sólidas. Con el sistema usado antes en las minas de carbón pasando los humos por un tanque con agua, apenas se retenía el 25% de hidrocarburos y al-

■ Esquema 3 ■ Catálisis oxidativa del diésel



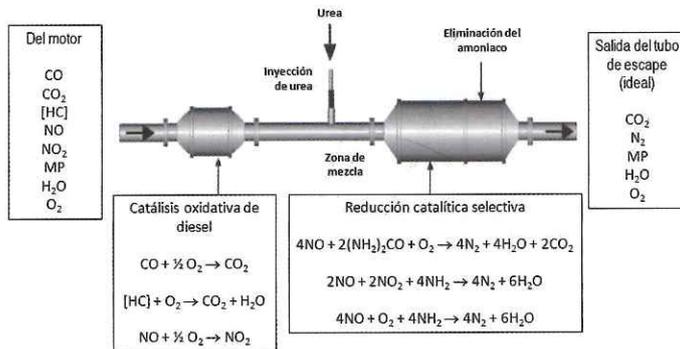
dehídos, un 30-50% de inquemados y algo más del 50% del SO_2 , pero no tenía efecto sobre el CO y el NO_x , eran voluminosos y había que cambiar el agua con frecuencia. Así, se rebaja la temperatura de los humos ($< 70^\circ \text{C}$) y se atenúa el ruido pero se produce niebla. Tenían la ventaja de eliminar chispas y partículas y refrigerar los gases.

Otro método tradicional fue el difusor, a modo de campana, situado en el escape que, inyectando radialmente los humos y por efecto Venturi, induce la entrada de aire para diluirlos, justo antes de ser expulsados a la atmósfera.

El purificador catalítico de gases propicia la oxidación del CO, de los hidro-

¿Qué valor de referencia hay que aplicar para evaluar la exposición de trabajadores que emplean maquinaria diésel?

Esquema 4 ■ Catálisis oxidativa y reductora



carburos y sus derivados, los aldehídos y la fracción orgánica de la DPM pero se ha de diseñar para que no se oxide el SO₂ a SO₃ y el NO a NO₂ (esquema 3 y figura 3).

Para que funcione, la temperatura ha de ser al menos de 300° C, de ahí que dé problemas en el arranque del motor en frío. Se reduce hasta en un 99% el CO y hasta un 90 % los hidrocarburos con aldehídos aunque se aumenta el contenido en NO₂ y SO₂. Las partículas se reducen pero no por acción directa ya que se debe a la oxidación de la fracción orgánica.

Se trata de un cartucho formado por celdillas metálicas o de un material cerámico arcilloso (cordierita o Mg₂Al₄Si₅O₁₈) impregnado con el catalizador que se puede envenenar por los aditivos o impurezas del carburante o lubricantes (fósforo, cinc, metales pesados, azufre). A temperaturas altas (> 650° C) dan problemas.

El cartucho filtrante consumible para partículas (figura 4) está en un recipiente de acero inoxidable que se acopla al tubo de escape y tiene una configuración laberíntica en forma de panel de fibras para darle una superficie de contacto suficiente entre los humos y el catalizador, sin crear excesiva pérdida de carga. No hay que sobrepasar cierta temperatura según sea la naturaleza de

las fibras, y retienen del 80% al 90 % de las partículas.

Los filtros recuperables son de cerámica (cordierita o carburo de silicio) porosa, ya sean de fibras cerámicas o metálicas como para resistir temperaturas que permitan la regeneración por la combustión de las partículas. Si la temperatura alcanza los 600° C durante cierto tiempo, no se necesita dispositivo adicional. En caso contrario hace falta utilizar alguno de los medios siguientes:

- Sistema de calentamiento de los gases de escape
- Catalizador que disminuya la temperatura de combustión de las partículas de carbono (filtro catalítico o catalizador añadido al carburante). El catalizador puede ser una mezcla de metales (platino, paladio, rodio, óxidos de titanio o zirconio) y otros metales base (vanadio, molibdeno y niobio), aunque se sustituyan por platino para reducir la oxidación de SO₂ a SO₃. Se retiene hasta el 90% de la masa y también es eficaz para las ultrafinas.

El inconveniente es que, como necesita altas temperaturas para producir la oxidación, la eficacia es menor con el motor a ralentí y no sirve para el NO_x.

El problema subsiste con los óxidos de nitrógeno que no se eliminan por

oxidación sino por reducción. En algún motor diésel se ha aplicado un sistema de reducción catalítica selectiva con sustancia reductora (urea o amoníaco disuelto en agua) para reducir el NO_x (esquema 4).

9. Conclusiones

- 1) Los motores de diésel dan lugar a una contaminación química compuesta por un conjunto de gases y partículas de carbón, tanto finas como ultrafinas, sobre las que se adsorben compuestos orgánicos de composición compleja y entre los que pueden estar presentes los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH), aerosoles ácidos, sulfatos y óxidos metálicos. Las micropartículas son consideradas, entre otros, como responsables del calentamiento climático.
- 2) Desde hace tiempo estas emisiones son reconocidas como causantes de irritaciones transitorias, inflamaciones, alergias y alteradoras de la función pulmonar y cardiaca.

Parece cada vez más evidente que las partículas emitidas en el escape de los motores de diésel pueden ser la causa de un incremento del riesgo de cáncer de pulmón en los trabajadores expuestos, en especial, si se dan condiciones ambientales desfavorables, la maquinaria empleada es antigua y no se efectúa un programa adecuado de revisión y mantenimiento.

- 3) Aunque en España no se contempla este contaminante en el listado de los Valores límite ambientales (VLA) de la publicación "Límites de exposición profesional" (LEP)", sí aparece en los MAK alemanes y existen procedimientos para la toma de muestra y análisis químico que permiten evaluar su exposición.

4) Por tal motivo, se considera prioritario conocer el estado actual de las condiciones de trabajo en las que se llevan a cabo las actividades en galerías subterráneas y en especial en el caso de minas que no sean a "cielo abierto", diferenciando las de carbón, las metálicas y las no metálicas (salinas) y teniendo en cuenta el estado de la maquinaria diésel y el nivel y eficacia de la ventilación aplicada.

5) En el estudio a realizar, tanto retrospectivo como prospectivo, se deben incluir aspectos tales como:

- Riesgos para la salud.
- Contaminación de los ambientes laborales y urbanos.

- Medida de las exposiciones.
- Medios de prevención (filtros para partículas, mejoramiento de los motores diésel, motores híbridos...).
- Evaluación de la eficacia de los dispositivos de filtración.

6) Cuando sea posible, se deberá sustituir la maquinaria diésel por eléctrica, en especial en espacios confinados (como galerías subterráneas), tales como en:

- Equipos de material fijo o semimóvil (compresor, bomba de hormigón, cargadora, perforadora...).
- En la extracción y retirada de material, usar maquinaria eléctrica (arran-

que puntual de material, transportadora de banda, pórtico...).

Para los trabajos en naves:

- Organizar el trabajo para el uso de motores térmicos.
- Usar preferentemente carretillas eléctricas o a gas.

7) Prestar una atención especial a la eliminación o el control de contaminantes en la fuente y en el diseño de los motores y respecto al combustible, utilizar los que no contienen azufre. Finalmente, se recomienda la práctica de un buen programa de revisión y mantenimiento. ●

■ Bibliografía ■

AIOH. Diesel particulate and Occupational Health Issues (2007)
http://www.aioh.org.au/downloads/documents/PositionPapers/AIOH_DieselParticulatePositionPaper.pdf

NIOSH. Diesel aerosols and gases in underground mines: Guide to exposure assessment and control. Report 9687 (2011)
<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/2012-101.pdf>

NIOSH. Overview of diesel emissions control technologies available to underground mining industry. Bugarski, A. (2003)
<http://www.cdc.gov/niosh/mining/workshops/diesel/metalworkshop/2BugarskiOverview.pdf>

AISS- IGF. Diesel engine exhaust: is a more complete view necessary? Focus Dahman 2010

Garshick E., Laden F., Hart J.E., Davis M.E., Eisen E.A., Smith T.J. Lung Cancer and Elemental Carbon Exposure in Trucking Industry Workers. Environmental Health Perspectives. Volume 20. Number 9. September 2012.

Successful application of DPF System at Vale's Creighton Mine. VALE 2010

NIOSH. MDEC 2009 Forum on diesel particulate filters (DPF). A. Bugarski. Toronto 2010
http://mdec.ca/2010/S7P1_bugarski.pdf

EPA. Diesel particulate matter/ Airtoxics in New England.
<http://www.epa.gov/region1/eco/airtox/diesel.html>

HSE. Control of diesel engine exhaust emissions in the workplace. HSG 187
<http://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg187.htm>

Society for Mining, Metallurgy & Exploration. Underground Ventilation Unit Committee.

<http://www.smenet.org/uvc>

The International Journal of Ventilation.

<http://www.ijvent.org.uk/>

NIOSH.

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/topics/topicpage2.htm>

OSHA. Diesel Particulate Matter (as Elemental Carbon). Analytical Method No. 5040, (2003).

<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/5040.pdf>

IRSST. Comparaison de deux indices d'exposition à la matière particulaire de diésel.

<http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-468.pdf>

IRSST. Mesure de la matière particulaire diésel dans les mines.

<http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/RF-287.pdf>

GESTIS - Analytical methods.

<http://amcaw.ifa.dguv.de/substance/methoden/122-L-Diesel.pdf>

GESTIS - International limit values for chemical agents Occupational exposure limits (OELs).

http://limitvalue.ifa.dguv.de/Webform_gw.aspx

WHO. "Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP".

http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0020/182432/e96762-final.pdf

OSHA. Diesel Exhaust/Diesel Particulate Matter

http://www.osha.gov/dts/hazardalerts/diesel_exhaust_hazard_alert.html