

Efectos de la composición del gas-oil sobre las emisiones contaminantes

Vicente R. Bermúdez Tamarit

CMT-Motores Térmicos, Universidad Politécnica de Valencia

Camino de Vera, s/n, CP. 46022, Valencia, España

Teléfono: (34) 963877650. Fax: (34) 963877659

bermudez@mot.upv.es

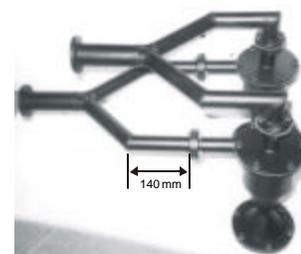
Simón Martínez Martínez

FIME-UANL.

Apdo. Postal 076 Suc F, CP. 64450, San Nicolás, N.L., México

Teléfono: (52) 81-83294020. Fax: (52) 81-83320904

simartin@mot.upv.es



RESUMEN

Un estudio experimental fue realizado con un motor Diesel de inyección directa (ID) empleando diferentes combustibles. La evaluación de la influencia de la composición del diesel sobre las emisiones se realizó en diferentes condiciones de carga y regímenes de giro, con el objetivo de determinar el efecto del contenido de compuestos aromáticos del diesel sobre las emisiones contaminantes. El trabajo se dirigió fundamentalmente a la caracterización de partículas, emisión de contaminantes, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos sin quemar. Los resultados obtenidos ayudan a definir la formulación del combustible más apropiada para reducir emisiones contaminantes.

PALABRAS CLAVE

Inyección directa, motor encendido por compresión, detector de ionización de flama por medio de hidrógeno, analizador de quimiluminiscencia, analizador no dispersivo en infrarrojo.

ABSTRACT

An experimental study was made in a direct injection (DI) Diesel engine using different fuels. The evaluation of the influence of the diesel composition over the pollutant emissions was made in different load conditions and engine speeds with the objective to fix the effect of the fuel aromatic content on the emissions. The aim was to conduct a characterization of particles, nitrogen oxides, soot and unburned hydrocarbons. The results help to define the most appropriate fuel formulation to reduce pollutant emissions.

KEYWORDS

Direct injection, compression ignited engine, flame ionization by hydrogen detector, chemiluminescence analyzer, nondispersivo infrared analyzer.

NOMENCLATURA

MEC	= Motor encendido por compresión.
ID/DI	= Inyección directa.
IDI	= Inyección indirecta.
EGR	= Recirculación de gases de escape.
F	= Dosado.
m	= Masa.

SUBÍNDICES

f	= Combustible.
a	= Aire.
e	= Estequiométrico.
R	= Relativo

INTRODUCCIÓN

Desde la última década del siglo XX, las normativas de emisiones contaminantes impuestas a los vehículos de automoción han sido cada vez más restrictivas,¹ de esta forma se presiona a los fabricantes de motores para que construyan máquinas más eficientes y menos agresivas con el medio ambiente. En el caso de los motores encendidos por compresión (MEC), las emisiones contaminantes más problemáticas se centran, por un lado, en la emisión de humos y partículas, y por otro, en la concentración de óxidos de nitrógeno (NOx) e hidrocarburos sin quemar (THC). Lo anterior ha llevado a establecer normas de emisión de contaminantes cada vez más estrictas (tabla I) para proteger el medio ambiente, además de ser un parámetro base para la economía del área de automoción.

El combustible utilizado en los MEC es uno de los principales responsables de las emisiones contaminantes de estos motores, ya que sus propiedades físicas y su formulación química repercuten en el proceso de mezclado, condicionando las reacciones químicas de la combustión.^{2 y 3} Atendiendo a esta premisa, el presente trabajo ha tenido como principal objetivo, obtener la cuantificación de las emisiones producidas por un motor Diesel de inyección directa, funcionando con combustibles diesel de diferente formulación química. El estudio fundamentalmente se dirigió a determinar la relación entre el contenido de hidrocarburos aromáticos del diesel y las emisiones de humos, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos sin quemar.

Tabla I. Normativas europeas de emisiones contaminantes para vehículos ligeros (Directiva 1999/96/CE).

Tipo de emisión	EURO II (1996)	EURO III (1999)	EURO IV (2004)
NOx + THC	0,90 g/km	0,56 g/km	0,30 g/km
Partículas	0,10 g/km	0,05 g/km	0,025 g/km

TRABAJO EXPERIMENTAL

Para realizar el estudio experimental, se instaló el motor en un banco de ensayos dotado de sistemas e instrumentos que permitían controlar, tanto su punto de operación como la determinación de su desempeño.

Se eligió un motor diesel de inyección directa, representativo de los modernos motores de encendido por compresión actualmente utilizados en los automóviles europeos. En la tabla II se muestran las características técnicas de este motor.

SISTEMA DE MUESTREO DE EMISIONES

El motor fue instalado en una sala de ensayos, que además de estar equipada con los sistemas de control mencionados en el apartado anterior, también cuenta con dispositivos de medida de emisiones gaseosas, tales como: H.F.I.D . (Detector de Ionización de Flama por medio de Hidrógeno), C.L.A . (Analizador de quimiluminiscencia) y N.D.I.R . (Analizador no dispersivo en Infrarrojo),

Tabla II. Especificaciones del motor.

Tipo de motor	Turbo diesel-inyección directa
Cilindrada	1900 cm ³
No. de cilindros	4
Diámetro/carrera	80/90 mm
Relación de compresión	18,3
Potencia/régimen de giro	70 kW/4500 min ⁻¹
Par/régimen de giro	190 Nm/2000 min ⁻¹

una sonda de dilución para el muestreo de partículas, tal como se muestra en la figura 1, y un sistema de recolección de partículas basado en ciclones, diseñados y construidos especialmente para este estudio, en la figura 2A se muestra el sistema de ciclones utilizado durante la sesión experimental. El principio de funcionamiento de los ciclones se basa en el efecto que la fuerza centrífuga ejerce sobre las partículas. Como se aprecia en la figura 2B, se obliga a los gases a entrar a través de un tubo tangencial, describiendo una trayectoria tangencial, lo que hace que las partículas se depositen en el fondo mientras los gases salen por el tubo superior que se encuentra en el interior del cilindro. Debido a que la eficiencia en la recolección de este sistema de partículas se reduce a partículas con diámetro superior a las 5 μm , el tubo de salida de los gases tiene en su extremo inferior una rejilla que hace las veces de filtro. Su misión es atrapar las partículas de tamaño pequeño y servir de separador entre el tubo de salida y el cilindro. De este modo, se impide que las partículas queden suspendidas sin depositarse en el cono colector debido a las turbulencias creadas por la trayectoria de los gases.

El muestreo de partículas se llevó a cabo utilizando una tasa de dilución (relación del caudal de gases de escape de la muestra Vs el caudal de aire utilizado para la dilución del total de la muestra) de 3.3 y un tiempo de muestreo de 180 segundos. Los filtros de la sonda de dilución se acondicionaron en una cámara climática a 22 °C y 45 % de humedad, antes y después de ser utilizados en la sonda de

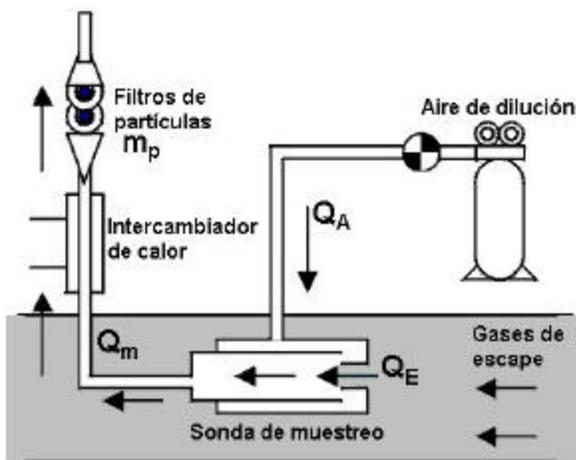


Fig. 1. Sonda de dilución y muestreo

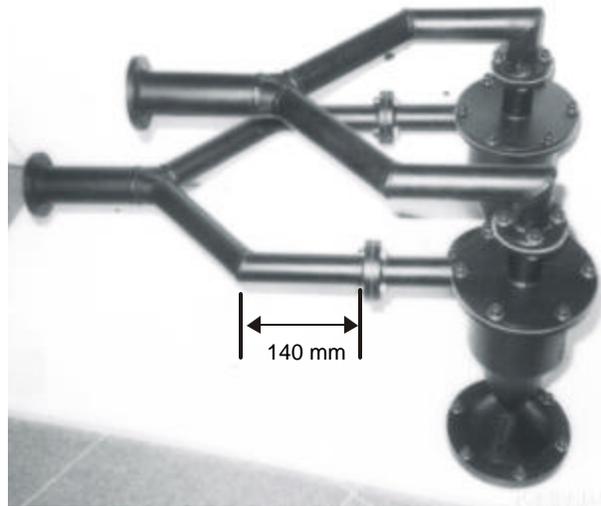


Fig. 2A. Ciclones utilizado en la sesión experimental.

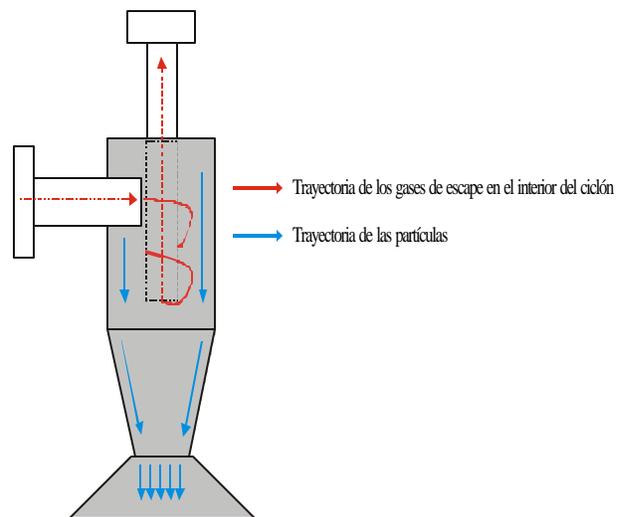


Fig. 2B. Esquema de funcionamiento del ciclón recolector de partículas.

muestreo. El peso de estos filtros se realizó con una balanza analítica con una resolución de 0.01 mg.

PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LOS COMBUSTIBLES

Se emplearon 4 combustibles, tres diesel de igual formulación base y diferente concentración de hidrocarburos aromáticos (5%, 15% y 25 % de aromáticos) y un diesel comercial. (tabla III).

Tabla III. Características físico-químicas de los combustibles.

Tipo de combustible	Estándar (Referencia)	5% Aromáticos	15% Aromáticos	25% Aromáticos
Aromáticos (%v)	30	4.3	14.2	24.4
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	847.4	819.3	827.8	821.6
Temperatura del 95% de destilado (°C)	360	318	311	317
Viscosidad (mm ² /s)	2.64	2.2	2.34	2.01
Azufre (%m)	0.0434	0.0043	0.0042	0.0047
Número de Cetano	49	51.8	50.7	54

CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL MOTOR

Para la caracterización del comportamiento de los combustibles en el motor, se evaluaron 4 regímenes de trabajo que abarcaran el funcionamiento global de un motor de automoción.⁵ En la figura 3 se pueden apreciar las condiciones de carga y régimen de giro de cada modo de operación seleccionado.

Después de analizar el comportamiento del motor en cada régimen, se decidió realizar el estudio de los cuatro combustibles para los diferentes modos "1

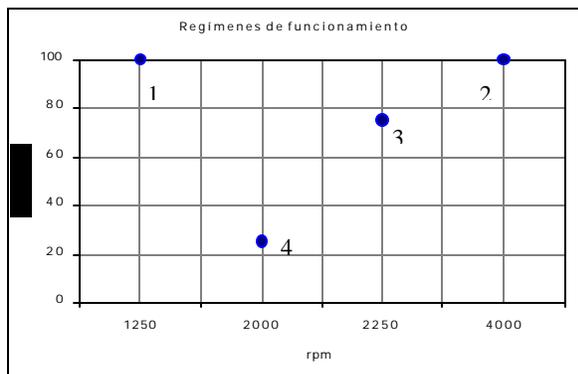


Fig. 3. Regímenes de carga y velocidad.

y 2" (plena carga 1250 y 4000 rpm respectivamente) y "3 y 4" (carga parcial 2000 y 2250 rpm respectivamente), siendo éstos los modos representativos de régimen de giro con mayor cantidad de emisiones contaminantes, en la Tabla IV se presentan el contenido de recirculación de gases de escape (EGR) y el dosado relativo (F_R) para cada combustible y punto de funcionamiento.

$$F_R = F/F_e \quad (1)$$

$$F = m_f/m_a \quad (2)$$

$$F_e = (m_f/m_a)_e \quad (3)$$

Tabla IV. Condiciones de funcionamiento para cada combustible.

Tipo de combustible	Punto de funcionamiento	Carga (%)	% de EGR	Dosado relativo
5% de aromáticos	1	100	0.0	0.659
	2	100	0.0	0.483
	3	75	0.0	0.485
	4	25	26.26	0.528
15% de aromáticos	1	100	0.0	0.754
	2	100	0.01	0.537
	3	75	0.0	0.536
	4	25	33.19	0.608
25% de aromáticos	1	100	0.0	0.678
	2	100	0.0	0.490
	3	75	0.0	0.507
	4	25	0.0	0.548
30% de aromáticos	1	100	0.0	0.733
	1	100	0.0	0.524
	1	75	0.0	0.515
	1	25	32.7	0.618

RESULTADOS

Las emisiones contaminantes producidas por los motores Diesel pueden estar condicionadas por diferentes parámetros, en los experimentos que se presentan en este trabajo sólo se han modificado las propiedades físicas y la composición química del combustible, así como las condiciones de operación del motor (carga, régimen de giro, % de EGR y dosado relativo). En las figuras 4 y 5, se muestran la masa específica de partículas para cada punto de funcionamiento de los diferentes combustibles, notándose que a plena carga y bajo régimen de giro

(punto de funcionamiento 1) hay un incremento significativo en la emisión de partículas al emplear el combustible estándar (30% aromáticos), sin embargo, a plena carga y alto régimen de giro (punto de funcionamiento 4) se mantiene aproximadamente constante la emisión de partículas, siendo totalmente independiente del tipo de combustible que se ha utilizado.

Este comportamiento está condicionado por los fenómenos que intervienen en el proceso de formación de la mezcla aire – combustible, a 1250 rpm, las condiciones de movimiento de aire en el interior del cilindro son menos favorables para lograr que el aire y el combustible se mezclen adecuadamente, además de existir mayor dosado con respecto al punto de funcionamiento a 4000 rpm, estos dos parámetros tienen mayor incidencia al emplear combustibles con densidad y viscosidad más

elevada, como es el caso del diesel estándar. Para los regímenes de carga parcial (puntos de funcionamiento 3 y 4), el comportamiento de las emisiones de partículas respecto al contenido de aromáticos del combustible es similar, pero en este caso también hay que destacar el efecto producido por la recirculación de gases de escape, como se observa en la figura 5, que al ser utilizado el combustible estándar a 2000 rpm y 32 % de EGR (punto 4), la masa específica de partículas se incrementa hasta rangos de aproximadamente 5 veces la fase inicial.

En las figuras 6 y 7, se puede comprobar que el contenido de compuestos aromáticos sólo adquiere importancia, si la concentración de éstos es superior a un 25%., confirmándose que el efecto del % de EGR y del dosado es significativamente importante en la emisión de NO_x, similares a los presentados en la referencia 6. A cargas parciales la utilización de

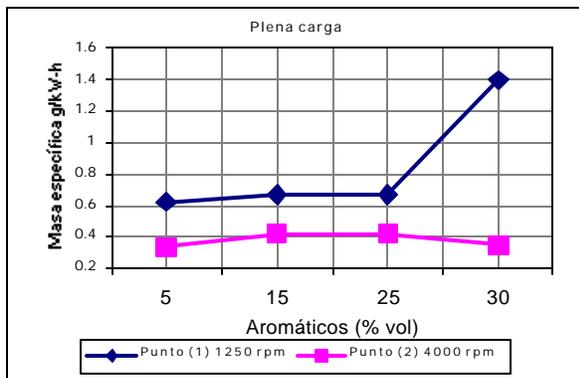


Fig. 4. Masa de partículas vs % de aromáticos.

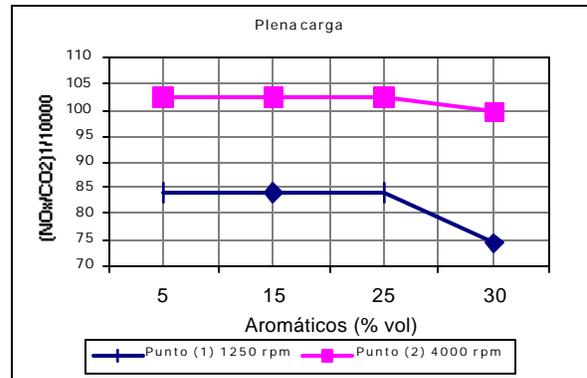


Fig. 6. Emisión de NO_x vs % de aromáticos.

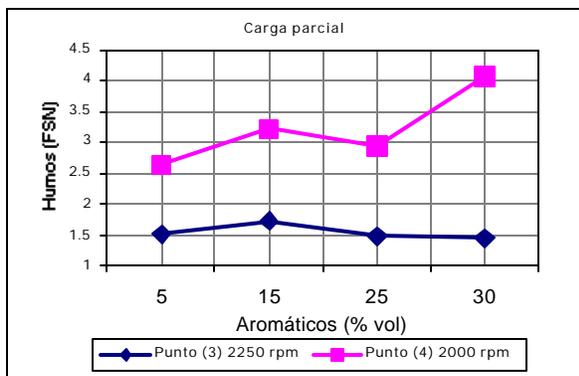


Fig. 5. Masa de partículas vs % de aromáticos.

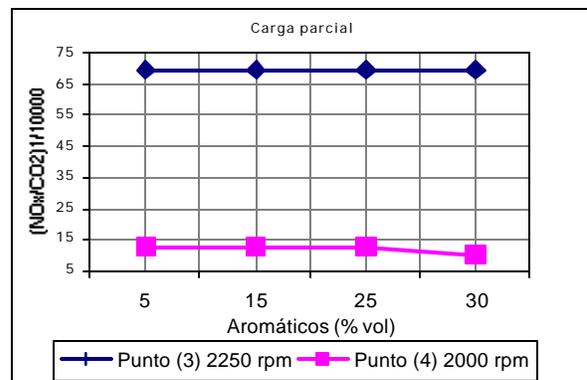


Fig. 7. Emisión de NO_x vs % de aromáticos.

recirculación de gases de escape permitió reducir hasta un 70 % las emisiones de NOx, mientras que en los regímenes a plena carga se observa que el menor exceso de aire en la mezcla para el punto de 4000 rpm, alcanzó incrementos del orden de un 20 % de estas emisiones respecto a las producidas a bajo régimen de giro (1200 rpm).

Los resultados experimentales demuestran que no existe una dependencia bien definida entre el contenido de aromáticos y la producción de hidrocarburos sin quemar (figuras 8 y 9). Posiblemente las propiedades físicas tengan mayor repercusión en este caso, que la propia concentración de compuestos aromáticos. Trabajos previos^{7,8y9} han estudiado el comportamiento de la producción de hidrocarburos sin quemar, encontrando en sus resultados que el contenido de aromáticos no tiene influencia lineal en este proceso.

Las emisiones de humos del motor tienen un comportamiento ascendente al incrementarse el contenido de aromáticos en el combustible, lo demuestran los resultados presentados en las figuras 10 y 11, este comportamiento es coherente con lo observado en la masa específica de partículas. Lo que confirma la correspondencia entre la magnitud de la Fracción Insoluble (masa de hollín y sulfatos presentes en las partículas muestreadas en la sonda de dilución) de las partículas y las emisiones de humos producidas. Estudios previos son los presentados en las referencias^{10y11}, los cuales muestran similitud con los resultados obtenidos en este trabajo.

CONCLUSIONES

- El contenido de hidrocarburos aromáticos del combustible diesel, tiene un efecto significativo en la masa específica de partículas emitidas. Combust-

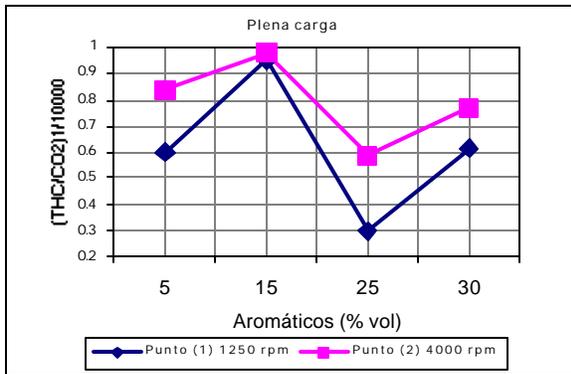


Fig. 8. Emisión de THC vs % de aromáticos.

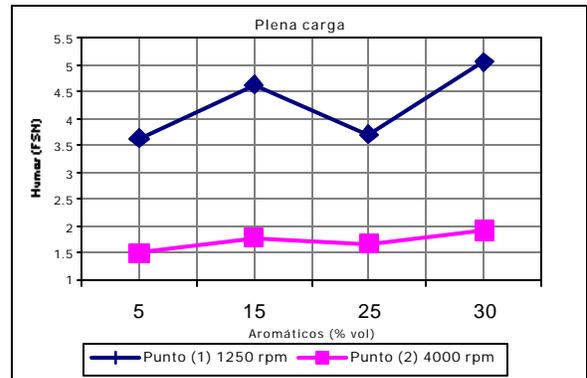


Fig. 10. Humos vs % de aromáticos.

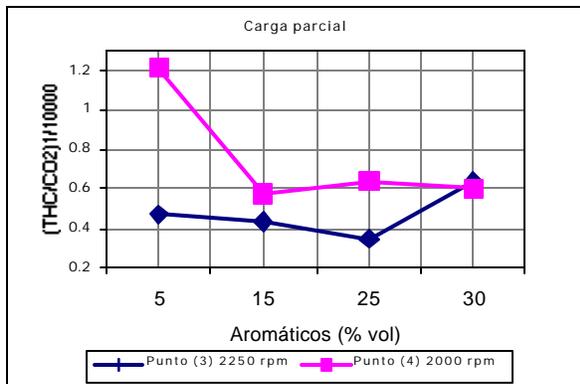


Fig. 9. Emisión de THC vs % de aromáticos.

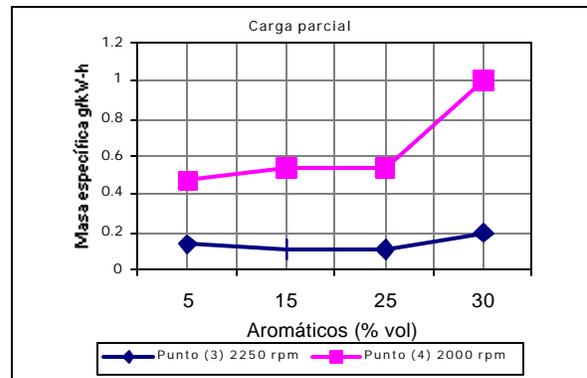


Fig. 11. Humos vs % de aromáticos.

tibles con similar formulación base, al incrementar el contenido de hidrocarburos aromáticos en un 10 %, pueden originar hasta un 40% más de masa de partículas emitidas. Esta tendencia puede verse incrementada por otras propiedades físicas debido a su influencia en los procesos de atomización y evaporación del combustible.

- El contenido de hidrocarburos aromáticos no tiene repercusión importante sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno, sólo se encontraron efectos significativos modificando el % de EGR y la relación aire - combustible de la mezcla.
- Los resultados demuestran que se pueden reducir las emisiones de humos y partículas, si se reduce el contenido de compuestos aromáticos del combustible.
- El diesel estándar es el que tiene peor comportamiento respecto a las emisiones de humos y partículas. La causa de estos resultados es el efecto conjunto del alto contenido de hidrocarburos aromáticos, densidad y viscosidad elevadas, así como su menor volatilidad y número de cetano (índice que evalúa la inflamabilidad de los combustibles diesel) que el resto de combustibles evaluados. Los resultados obtenidos con los combustibles de igual formulación base, demuestran que es posible reducir las emisiones contaminantes realizando pequeñas modificaciones en las propiedades físico-químicas de cada combustible.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Consellería de Cultura, Educación y Ciencia de la Generalitat Valenciana, por la financiación del proyecto GV00-116-11, dirigido al estudio de las emisiones contaminantes de los motores Diesel de automoción.

BIBLIOGRAFÍA

1. Michael P. Walsh., "Global Trends in Diesel Emissions Regulations –A 2001 Update" SAE technical paper 2001-01-0183, 2001.
2. Heywood, J.B., "Internal combustion engine fundamentals". Mc Graw Hill, New York, 1989.
3. Baumgard, K. y Johnson, J., "The effect of fuel and engine design on Diesel Exhaust Particle Size Distribution". SAE technical paper 960131, 1996.
4. Arcoumanis., "Evaluation of A Cyclone-Based Particulate Filtration System for High-Speed Diesel Engines". IME D01294 Vol. 208 pp. 269-279, 1994.
5. Abe, T., "Diesel Engine Operating Conditions and Particulate Matter Emission Characteristics on Road". JSAE VOL.11 N°1, pp. 73-75, 1990.
6. Terry L. Ullman, Robert L. Mason y Daniel A. Montalvo., "Effects of Fuel Aromatics, Cetane Number, and Cetane Improver on Emissions from a 1991 Prototype Heavy-Duty Diesel Engine" SAE technical paper 902171, 1990.
7. Marsahall, W.F. y Fleming, R.D., "Diesel Emissions as Related to Engine Variables and Fuel Characteristic " SAE technical paper 710836, 1971.
8. Gross, G.P. y Murphy, K.E., Jr., "The Effects of Diesel Fuel Properties on Performance, Smoke, and - Emissions" ASME 78-DGP-26, July, 1978.
9. Burley, H.A. y Rosebrock, T.L., "Automotive Diesel Engine-Fuel Composition vs Particulates" SAE technical paper 790923, 1979.
10. Kouremenos D.A., Hountals D.T., Pariotis E.G., Kouremenos A.D. y Papagiannakis R.G., "Experimental Investigation to Determine the Effect of Fuel Aromatic Content on Gaseous and Particulate Emissions of IDI Engines" SAE technical paper, 2000-01-1172, 2000.
11. Payri, F., Bermúdez, V. y Martínez, S., "Caracterización de las Emisiones de Partículas de un Motor Diesel de Inyección Directa". Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica". Mérida, Venezuela, 2001.