

Caracterización de las emisiones de partículas de un motor diesel de inyección directa

Direct injection diesel engine emission particles characterization

F. Payri G., V.R. Bermúdez T*.
CMT. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, UPV,
Valencia 46022, España
*bermudez@mot.upv.es

S. Martínez M.
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL,
San Nicolás de los Garza N.L. 66450, México
simartin@mot.upv.es

Resumen

Se presenta el estudio realizado con un motor Diesel de inyección directa empleando diferentes gasóleos, siendo uno de ellos, un "biodiesel". La evaluación de la influencia de la composición del gasóleo sobre las emisiones contaminantes, se realizó en diferentes regímenes de carga y régimen de giro, representativos del ciclo urbano establecido por la normativa de homologación europea. Se analizaron las partículas y los gases de escape emitidos, con objeto de determinar el efecto del contenido de compuestos aromáticos del gasóleo sobre las emisiones contaminantes. El trabajo se dirigió fundamentalmente a la caracterización físico-química de las partículas para determinar su relación con el contenido de hidrocarburos aromáticos del combustible y las propiedades físicas de este último. Al contrastar la información obtenida de estos análisis y la composición de los gasóleos utilizados, se pudieron establecer las principales vías de emisión de los distintos compuestos químicos presentes en el escape. Estos resultados ayudan a definir la formulación del combustible más apropiada para reducir emisiones contaminantes.

Palabras claves: Compuestos aromáticos, biodiesel, dosado relativo, motor diesel, inyección directa.

Abstract

The study was carried out with a Diesel engine of direct injection using different gasoils, including biodiesel. The evaluation of the gasoil composition influence on polluting emissions was made in different load regimes and turn regimes, representative of the urban cycle established by the norm of European Standards. The particles and exhaust gases were analyzed in order to determine the effect of the aromatic content of the gasoil on the polluting emissions. The work centred principally on the physical and chemical characterization of particles to determine its relation with the aromatic hydrocarbon content of the fuel and the physical properties of this last one. When contrasting the obtained information of these analyses and the composition of used gasoils, the main ways of emissions of the different compound chemicals present in the exhaust could be established. These results help to define the formulation of the most appropriate fuel to reduce polluting emissions.

Key words: Aromatic compounds, biodiesel, equivalence ratio, diesel engine, direct injection.

1 Introducción

Desde la última década del siglo XX, las normativas de emisiones impuestas a los vehículos de automoción son

cada vez más restrictivas, 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 del motor de encendido por compresión (MEC), una

de las emisiones contaminantes más problemáticas son las partículas.

Tabla 1. Normativas europeas de emisiones de partículas (Directiva 1999/96/CE)

Tipo de Vehículo	EURO II (1996)	EURO III (1999)	EURO IV (2004)
Vehículos Ligeros	0,10 g/km	0,05 g/km	0,025 g/km
Vehículos Pesados (> 85 kW)	0,30 g/kWh	0,10 g/kWh	0,10 g/kWh

El combustible utilizado en los MEC es uno de los principales responsables de las emisiones de escape de estos motores, ya que sus propiedades físicas y su formulación química, repercuten en el proceso de preparación de la mezcla, condicionando las reacciones químicas del proceso de combustión (Heywood 1989; Baumgard y Jonson 1996). Atendiendo a esta premisa, este trabajo ha tenido como principal objetivo, la caracterización de las partículas emitidas por un motor Diesel de inyección directa, funcionando con gasóleos de diferente formulación química. El estudio se dirigió a determinar la relación entre el contenido de hidrocarburos aromáticos del gasóleo y las emisiones de partículas, el tamaño medio de las mismas y su composición química (fracción soluble e insoluble). También era objetivo de este estudio verificar el grado de correspondencia entre la opacidad de los humos y la fracción insoluble de las partículas y entre la fracción soluble de las partículas y las emisiones de hidrocarburos (HC).

2 Trabajo experimental

Para realizar el estudio experimental se instaló el motor en un banco de ensayos dotado de sistemas e instrumentos que permitían controlar su punto de operación y determinar sus prestaciones.

Se eligió un motor Diesel de inyección directa representativo de los motores de encendido por compresión utilizados en los automóviles europeos. La tabla 2 recoge sus características técnicas.

Tabla 2. 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

Sistema de muestreo de partículas

El motor fue instalado en una sala de ensayos equipada con dispositivos de medida de emisiones gaseosas

(H.F.I.D., C.L.A. y N.D.I.R), una sonda de dilución para el muestreo de partículas (figura 1) y un sistema de recolección de partículas basado en ciclones (Arcumanis et al., 1994), diseñados y contruidos especialmente para este estudio (figura 2).

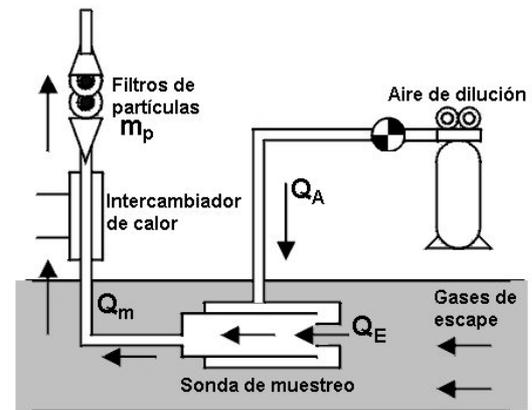


Fig.1. Sonda de dilución y muestreo

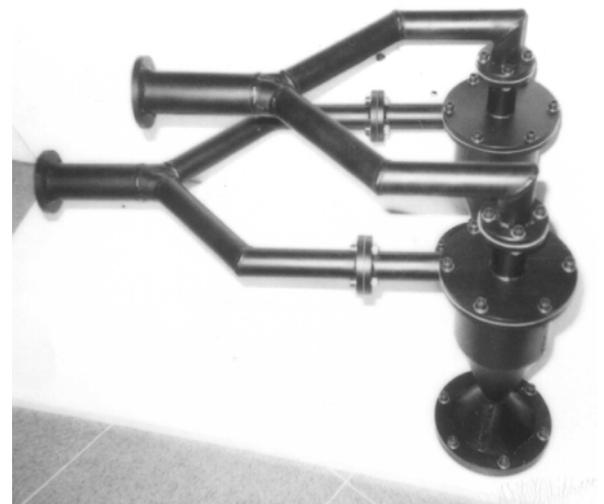


Fig. 2. Ciclones

El muestreo de partículas se realizó utilizando una tasa de dilución de 3.3 y un tiempo de muestro 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 muestro. El pesado de los filtros se realizó con una balanza analítica de resolución 0.01 mg.

Propiedades físico-químicas de los combustibles

Se emplearon 5 combustibles, tres gasóleos de igual formulación base y diferente concentración de hidrocarburos aromáticos (5%, 15% y 25 % de Aromáticos), un gasóleo comercial y un biodiesel de origen vegetal. (tabla 3).

Tabla 3. Características de los combustibles

Tipo de combustible	Estándar	5% aromáticos	15% aromát	25% aromát	Biodiesel
Aromáticos (%v)	29,3	4,3	14,2	24,4	-
Densidad a 15°C (kg/m ³)	847,4	819,3	827,8	821,6	837,9
Temperatura del 95% de destilado (°C)	360	318	311	317	341
Viscosidad (mm ² /s)	2,64	2,2	2,34	2,01	2,65
Azufre (%m)	0,0434	0,0043	0,0042	0,0047	0,0026
Número de Cetano	49	51,8	50,7	54	54,3

Condiciones de operación del motor

Para evaluar el comportamiento de los combustibles en el motor, se evaluaron 5 regímenes de trabajo que abarcaran el funcionamiento global de un motor de automoción (Abe et al, 1990). En la figura 3 se pueden apreciar las condiciones de carga y régimen de giro de cada modo de operación seleccionada, y en la figura 4 se muestran la masa específica de partículas para cada modo de funcionamiento con el combustible estándar.

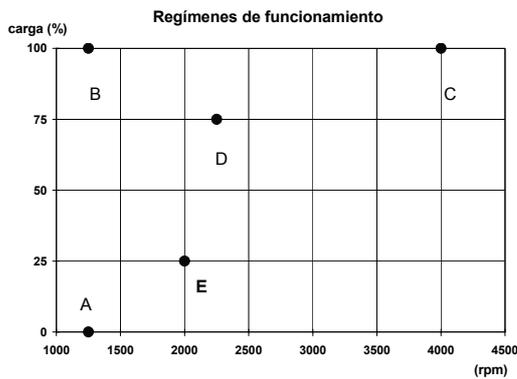


Fig. 3. Regímenes de carga y velocidad

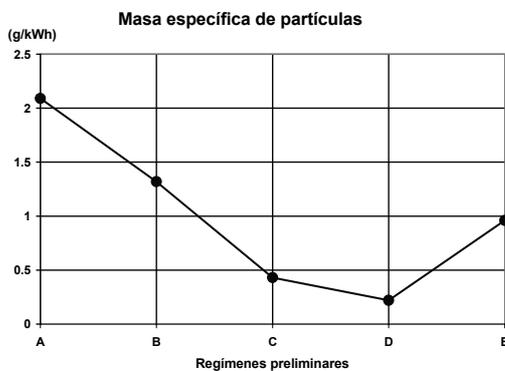


Fig. 4. Emisiones de partículas

Después de analizar el comportamiento del motor en cada régimen se decidió realizar el estudio de los diferentes combustibles en el modo “E” (2000 rpm y 3 bar de presión media efectiva), por ser éste el modo representativo de régimen de circulación urbana, con mayor cantidad de partículas emitidas.

3 Resultados obtenidos

Las figuras 5 y 6 recogen el comportamiento de las emisiones de partículas en función del dosado relativo del motor y del contenido de hidrocarburos aromáticos del gasóleo. En ellas se puede apreciar que a pesar de utilizar mezclas de aire-combustible de diferente calidad, la incidencia del contenido de hidrocarburos tiene un efecto predominante en la masa de partículas emitidas. Estos resultados indican que la influencia de las propiedades físicas del gasóleo sobre el dosado relativo, tiene menos importancia que el contenido de hidrocarburos aromáticos cuando el gasóleo contiene más de un 15% de aromáticos.

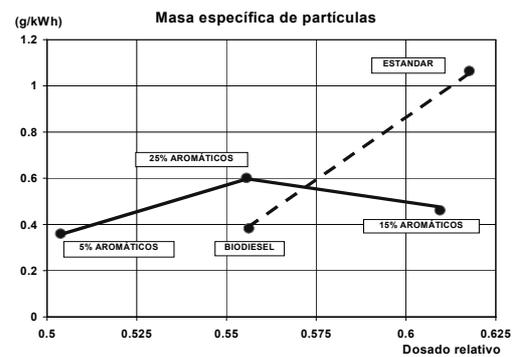


Fig. 5. Masa de partículas vs dosado

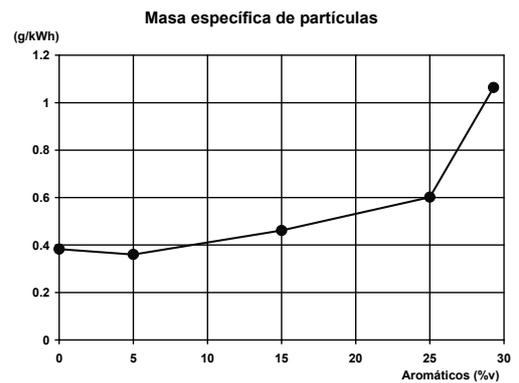


Fig. 6. Masa de partículas vs % aromáticos

Las partículas recolectadas en los ciclones durante cada ensayo fueron analizadas con un Microscopio Electrónico de Barrido (M.E.B.). Para la preparación de las muestras se usaron dos métodos diferentes: el metalizado en oro y la dilución en acetona. También se analizaron directamente las partículas atrapadas en los filtros de la sonda de dilu-

ción. En la figura 7 se presenta una de las imágenes adquirida con la cámara fotográfica digital acoplada al microscopio. Se analizaron 86 muestras de diferentes ensayos, siendo posible establecer la relación entre el contenido de aromáticos en el combustible y el tamaño medio de las partículas, como se muestra en la Figura 8.

Hay que destacar que los resultados en valores absolutos, varían según el método, pero las magnitudes relativas de tamaño de partículas son similares, independientemente del método utilizado.

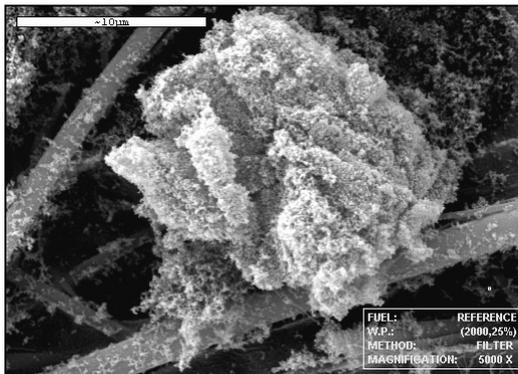


Fig. 7. Imagen adquirida del filtro

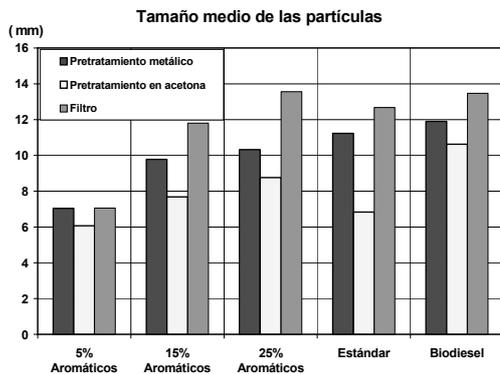


Fig. 8 Tamaño medio de partículas

Caracterización química de las partículas

Los filtros con partículas colectadas en la sonda de dilución, se sometieron a un proceso de extracción Soxhlet similar al propuesto por De Lucas et al (1999), de esta forma fue posible obtener la Fracción Soluble Orgánica (SOF.) y posteriormente determinar su composición química mediante cromatografía de gases. La Fracción Insoluble (ISF) se determinó mediante el pesado diferencial del total de la masa de las partículas antes y después del proceso de extracción Soxhlet. Los resultados obtenidos, representados en las Figuras 9 y 10 muestran que la relación entre el contenido de aromáticos en el combustible y la ISF de las partículas es prácticamente lineal, sin embargo en cuanto a la

SOF sólo se aprecia un incremento importante cuando el contenido de aromáticos sobrepasa el 15 %.

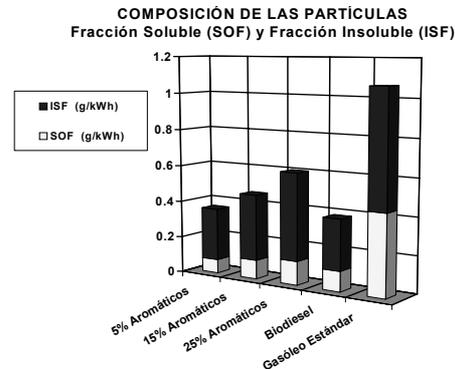


Fig. 9. ISF y SOF para cada combustible

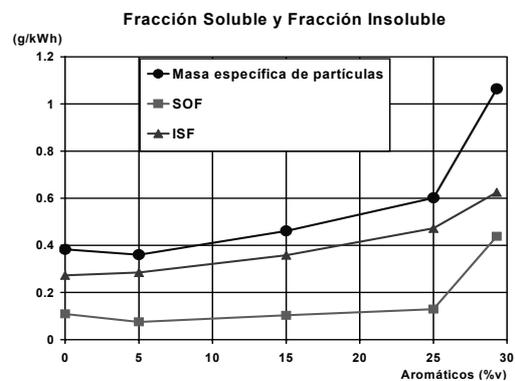


Fig. 10. ISF y SOF vs % de aromáticos

Para determinar la influencia del combustible y del lubricante en la fracción soluble de las partículas, se determinaron los cromatogramas del aceite, de los combustibles y de la SOF de las partículas. Analizando los tiempos de residencia de cada uno de ellos, se determinó que proporción de los hidrocarburos presentes en la SOF correspondía a compuestos del gasóleo o del lubricante.

Atendiendo a los resultados mostrados en la figura 12, la SOF de las partículas se ve afectada en igual proporción por el aceite y el combustible, independientemente del contenido de aromáticos que tenga el gasóleo.

Finalmente se compararon las emisiones gaseosas de hidrocarburos (HC) del motor con la SOF de las partículas y con el contenido de compuestos procedentes del combustible en la SOF (figura 13). Se puede observar que existe una clara relación entre las emisiones de hidrocarburos y el contenido de combustible en la SOF, solamente los resultados con el combustible de 5% de aromáticos difieren del comportamiento general, posiblemente porque el dosado con este gasóleo era muy bajo, siendo posible que se incrementaran las emisiones de hidrocarburos gaseosos debido al apagado de llama por un elevado exceso de aire en algunas zonas de la cámara de combustión. (Bergin, 1983)

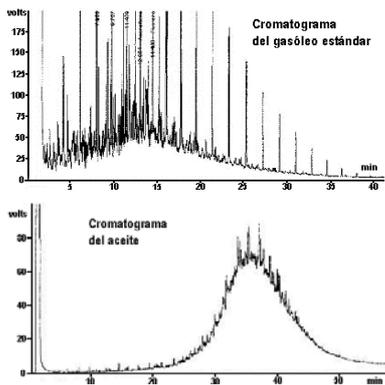


Fig. 11. Cromatogramas

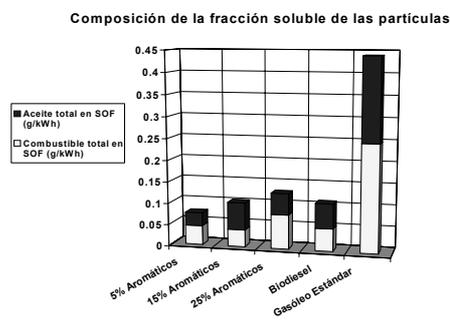


Fig. 12. Composición de la SOF de las partículas

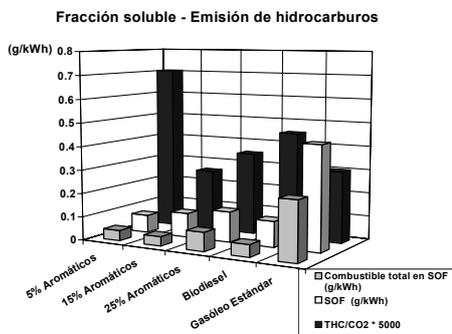


Fig. 13. Comparación SOF – HC

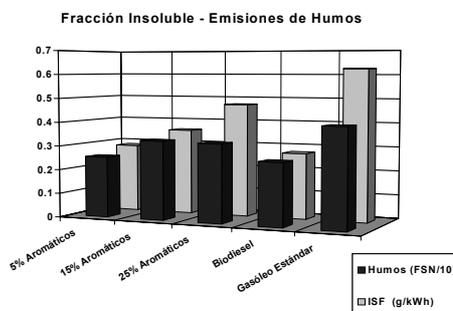


Fig. 14. Comparación ISF - Humos

También se compararon las emisiones de humos con la ISF de las partículas y se obtuvo una total correspondencia entre ambos parámetros (figura 14).

4 Conclusiones

-El contenido de hidrocarburos aromáticos del gasóleo, tiene un efecto significativo en la masa específica de partículas emitidas. Gasóleos con similar formulación base, al incrementarse su contenido de hidrocarburos aromáticos en 10%, pueden originar hasta 40% más de masa de partículas. Esta tendencia puede verse incrementada por otras propiedades físicas, debido a su influencia en los procesos de atomización y evaporación del combustible.

-Los métodos empleados para determinar el tamaño medio de las partículas, difieren en magnitud absoluta, pero en todos los casos se pudo comprobar que los combustibles de idéntica base química producen agregados de mayores dimensiones al incrementarse su contenido de aromáticos.

-Las partículas emitidas por el biodiesel utilizado dependen fundamentalmente de sus propiedades físicas ya que en su composición química no existen hidrocarburos aromáticos. Sin embargo aunque produce menor cantidad de partículas que los gasóleos convencionales ensayados, el tamaño medio de las partículas emitidas con el biodiesel es similar al de los gasóleos con mayor concentración de aromáticos. Resultados similares se han obtenido en otros trabajos (Hansen y Grouleff, 1997).

- Al evaluar el efecto del gasóleo sobre las dimensiones de las partículas, hay que tener en cuenta que desde el punto de vista biológico, la inhalación de las partículas por las personas, depende del diámetro medio de las mismas. En la medida que las partículas tengan menor diámetro, menor será su masa y mayor facilidad tendrán para mantenerse en suspensión en la atmósfera, incrementándose de esta forma la probabilidad de inhalación. Atendiendo a este análisis en los combustibles estudiados, las partículas emitidas son de mayor dimensión a medida que se incrementa el contenido de aromáticos de similar formulación base.

- Existe una proporción directa entre el incremento en la cantidad de aromáticos y el incremento de la Fracción Insoluble y la Fracción Soluble Orgánica de las partículas. Con todos los combustibles estudiados la ISF representa más del 70% de la masa de las partículas. La proporción de SOF varía según la composición química del combustible pero también está afectada por las propiedades físicas de éste, sobre todo en el caso del gasóleo estándar.

- La Fracción Insoluble y las emisiones de Humos tienen la misma tendencia frente al incremento de la cantidad de aromáticos en el combustible, esto corrobora que el contenido de hollín en la fracción insoluble constituye más del 90%

-También se encontró una buena correspondencia entre las emisiones gaseosas de hidrocarburos y la fracción soluble orgánica de las partículas. El resto de las emisiones parecen estar más afectadas por las características físicas de

los combustibles, que afectan a la relación aire-combustible de la mezcla.

5 Agradecimientos

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.

También desean agradecer a la Unión Europea y a los participantes en el proyecto D.I.F.U.S.O. por el apoyo prestado durante el desarrollo del presente trabajo.

Referencias

- Abe T, 1990, Diesel engine operating conditions and particulate matter emission characteristics on road, JSAE VOL.11 N°1, pp. 73-75.
- Arcoumanis C, 1994, Evaluation of a cyclone-based particulate filtration system for high-speed Diesel engines, IME D01294 Vol. 208 pp. 269-279.
- Baumgard K y Johnson J, 1996, The effect of fuel and engine design on Diesel exhaust particle size distribution, SAE technical paper 960131.
- Bergin S P, 1983, The influence of fuel properties and engine load upon the carbon and hydrocarbon fractions of particulate emissions from a light -duty Diesel engine, SAE 831736.
- Bermúdez V, Zubía P y Benabdallah T 2000, Efecto de la composición del gasóleo sobre las emisiones del motor Diesel, Anales de Ingeniería Mecánica, Madrid, España, Vol. 3, pp. 1889-1894.
- De Lucas A, Durán A, Carmona M y Lapuerta M 1999, Characterization of soluble organic fraction in DPM: optimization of the extraction method". SAE paper 1999-01-3532.
- Directiva 1999/96/CE del Parlamento Europeo y su Consejo
- Hansen K y Grouleff M, 1997, Chemical and biological characteristics of fuelled with rapessed oil methyl ester, SAE technical paper 971689.
- Heywood J B, 1989, Internal combustion engine fundamentals, Mc Graw Hill, New York.