

Estudio experimental sobre emisiones contaminantes en un motor diesel de 0.5 MW trabajando en condiciones de generación y cogeneración

Experimental study on polluting emissions in a 0,5 MW diesel engine working in generation and cogeneration conditions

M. Lapuerta *, O. Armas, A. Gómez.

Dpto. Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos. Universidad de Castilla - La Mancha. Ciudad Real. España

* mlapuer@ind-cr.uclm.es

J. Rodríguez

Dpto. Combustibles Fósiles. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Madrid. España

Resumen

La evolución de las normativas y legislaciones en diferentes regiones del mundo están obligando a los investigadores que trabajan en instalaciones de generación eléctrica y cogeneración a buscar vías más eficaces para el control de las emisiones contaminantes. Actualmente, las normativas que regulan las emisiones en motores de automoción son mucho más exigentes que las que regulan las emisiones de los motores de ≥ 0.5 MW que trabajan en condiciones estacionarias. En consecuencia, los métodos de medida y caracterización de emisiones que se emplean en los primeros han alcanzado un notable desarrollo.

Los resultados que en este trabajo se ofrecen son consecuencia de la aplicación de las técnicas y métodos comúnmente usados en motores de automoción a un motor Diesel de 0.5 MW trabajando en condiciones de generación y cogeneración en una instalación industrial a diferentes grados de carga. Entre los resultados obtenidos pueden destacarse las emisiones gaseosas mayoritarias y la caracterización fisicoquímica de las partículas recogidas mediante un minitúnel de dilución.

Palabras claves: Contaminación, emisiones contaminantes, cogeneración.

Abstract

Evolution of norms and legislation in different world regions are forcing investigators who work in electrical generation and cogeneration plants, to look for more effective ways to control polluting emissions. At the moment, automotive engine emission regulation norms are much more demanding than those for stationary engines (power ≥ 0.5 MW). Consequently, automotive engine measurement and emission characterization methods have reached remarkable evolution. Results presented in this work are obtained applying by the application of techniques and methods commonly used in automotive engines, to a 0,5 MW industrial plant diesel engine working at variable load in generation and cogeneration conditions. Noticeable results are the majority gaseous emissions and the physicochemical characterization of the particles collected in a dilution minitunnel.

Key words: Pollution, polluting emissions, cogeneration

1 Introducción

“.... Proporcionar a los responsables de la política de medio ambiente una evaluación objetiva del paquete de medidas más rentable para reducir las emisiones del sector del transporte por carretera a un nivel compatible con las nuevas normas de calidad del aire que se están elaborando en la Unión Europea....”.

Éste fue el objetivo que en 1992 se plantearon los Comisarios de Medio Ambiente, Industria y Energía, de la Unión Europea, invitando a las asociaciones de las industrias del automóvil (ACEA) y del petróleo (Europa) a aportar sus conocimientos técnicos y experiencia y a colaborar en la realización del programa europeo Auto Oil. El desarrollo de este programa ha traído como consecuencia una serie de medidas que han hecho evolucionar las norma

Tabla 1 Evolución de valores límites de contaminantes en fuentes móviles.

Motores Diesel. Transporte Pesado			
Emisión (g/kWh)	Euro III Hasta 10/2005	Euro IV Hasta 10/2008	Euro V
CO	2.1	1.5	1.5
HC	0.66	0.46	0.46
NOx	5.0	3.5	2.0
Partículas (PM)	0.1	0.02	0.02

tivas para restringir la emisión de contaminantes producidos por la mayoría de los tipos de motores en explotación, entre ellos los motores Diesel, hasta límites como los que se muestran en las tablas 1 y 2.

Tabla 2. Evolución de valores límites de contaminantes en fuentes móviles (no-automoción).

Motores Diesel		
Potencia efectiva: 130.....560 kW	Fase I Hasta 01/2002	Fase II
CO (g/kWh)	5.0	3.5
HC (g/kWh)	1.3	1.0
NOx (g/kWh)	9.2	6.0
PM (g/kWh)	0.54	0.2
Los valores límites para este rango de potencia se calculan mediante la suma ponderada de los valores de emisión medida a 100, 75 y 50% de carga multiplicados por los coeficientes de ponderación 0.3, 0.5 y 0.2 respectivamente establecidos en la ISO 8178.		

La reducción de las emisiones de fuentes móviles contribuye de forma importante, aunque no suficientes, los objetivos de calidad del aire futuros.

En este sentido, en el ámbito europeo, las directivas vigentes no contemplan limitaciones a las emisiones

producidas por los motores que vayan a ser utilizados en servicio estacionario de generación y cogeneración. Los motores que vayan a trabajar en este servicio, sólo deben cumplir las directivas medioambientales establecidas por la región donde este localizada la industria que vaya a utilizarlos. Es por ello que se están elaborando propuestas de normativas encaminadas a disminuir la emisión de este tipo de fuente.

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos en el trabajo y debido a que los motores usualmente empleados en servicio de generación estacionaria deben su tecnología base a la empleada en motores marinos, se ha utilizado como nivel de referencia los límites establecidos por el anexo VI (ver resumen en la tabla 3) de la normativa MARPOL 73/78 [4] promovida por la Organización Marítima Internacional (IMO), pendiente de adopción por los estados miembros. Una vez adoptada, su aplicación se hará con efecto retroactivo desde el 01/01/2000.

La posibilidad de aplicar el conocimiento, la experiencia y la instrumentación desarrollada para controlar las emisiones en un sector de tanto peso específico y tan restringido por las normativas como es el transporte, unido al creciente uso de grandes y medianos motores de generación y cogeneración en la industria, ha motivado la realización de este trabajo, cuyo objetivo fundamental ha sido el de caracterizar de la forma más detallada posible la emisión de este tipo de máquinas y con ello poder evaluar el posible potencial de reducción de ésta. Es importante destacar que el trabajo se ha realizado sobre una fuente que se ha mantenido trabajando en el proceso productivo de la empresa donde está instalada, dotando al trabajo de un interés adicional.

Tabla 3 Categoría de motores marinos. Normativa MARPOL 73/78. Anexo VI.

Categoría de motor	Tecnología base	Potencia (P, kW) o régimen (n, rpm)	Cilindrada unitaria (Vd, dm ³)	Límite de emisión (g/kWh)			
				NOx +THC	PM	CO	Fecha
1	Estacionarios	P ≥ 37	Vd < 0.9	7.5	0.40	5.0	2005
			0.9 ≤ Vd < 1.2	7.2	0.30	5.0	2004
			1.2 ≤ Vd < 2.5	7.2	0.20	5.0	2004
			2.5 ≤ Vd < 5.0	7.2	0.20	5.0	2007
2	Locomotoras		5.0 ≤ Vd < 15	7.8	0.27	5.0	2007
			15 ≤ Vd < 20 (P < 3300)	8.7	0.50	5.0	2007
			15 ≤ Vd < 20 (P ≥ 3300)	9.8	0.50	5.0	2007
			20 ≤ Vd < 25	9.8	0.50	5.0	2007
			25 ≤ Vd < 30	11.0	0.50	5.0	2007
				NOx			
3	Sólo Marinos	n < 130	Vd ≥ 30	17.0			-
		130 ≤ n < 2000		45*(n) ^{-0.2}			-
		n ≥ 2000		9.8			-

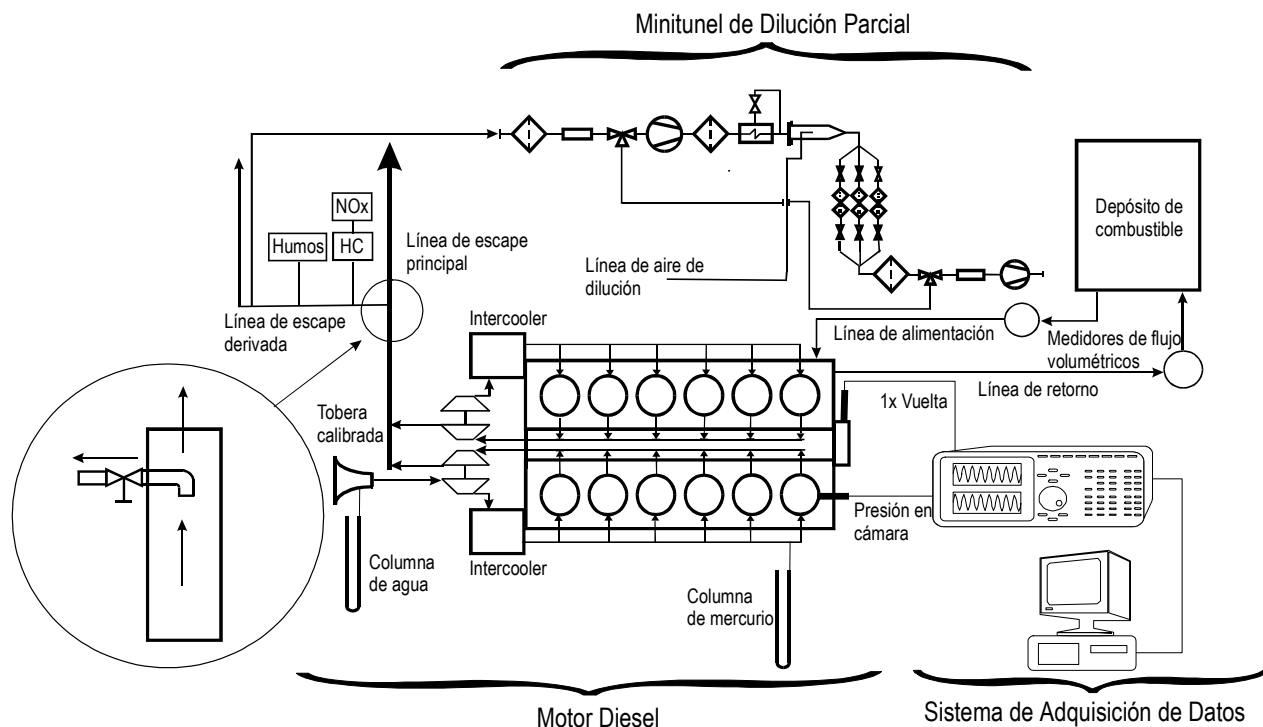


Tabla 4 Especificaciones del motor

Tipo de motor	ID / Turboalimentado
Sistema de inyección	Bomba en línea Bosch
Diámetro / Carrera (m)	0.15/0.15
Cilindros y disposición	12 V
Relación de compresión	14
Volumen desplazado (l)	31.8
Potencia máxima	500 kW a 1800 min ⁻¹
Par máximo	3000 Nm a 1500 min ⁻¹

2 Instalación experimental

El trabajo se ha realizado sobre un motor Diesel turboalimentado de Inyección Directa, modelo GUASCOR E-318 de 0.5 MW, considerado como un motor típico en plantas industriales de media potencia, acoplado a un generador de corriente eléctrica trabajando a una frecuencia de 50 Hz y cuyas principales características aparecen en la tabla 4. En ocasiones, este modelo de motor también es usado en aplicaciones marinas.

El motor está sobrealimentado por dos turbocompresores, uno para cada grupo de 6 cilindros. El aire admitido fue medido mediante una tobera calibrada conectada al grupo donde se encontraba el cilindro instrumentado para medir la presión en cámara. Para la determinación de la relación combustible/aire (dosado), se asumió que el gasto de aire medido era idéntico en ambos grupos de cilindros del motor. El gasto de combustible del motor se determinó mediante la diferencia de los gastos medidos por contadores volumétricos conectados respectivamente a la línea principal

de alimentación de combustible y a la de retorno al depósito.

Debido a la necesidad de establecer un determinado grado de dilución a la entrada del minitúnel de recogida de partículas y dada la magnitud del caudal de gases de escape a la salida del motor, el silencioso fue sustituido por un conducto con una línea de derivación de gases, tal y como se muestra en la zona ampliada de la figura 1. Esta línea, a la que se acoplaron todos los equipos de medida de contaminantes, fue dotada con una llave y un dispositivo que permitían regular y determinar respectivamente la velocidad de los gases y en consecuencia el caudal.

Complementariamente se midieron las temperaturas medias de escape a la entrada de las turbinas de cada turbocompresor, en la línea principal de salida de gases, así como el resto de las temperaturas de control del trabajo del motor (aire en la sala, refrigerante, lubricante, etc).

Con el objetivo de valorar el grado de sobrealimentación en cada punto de funcionamiento, así como para dar referencia de nivel a los datos de presión en cámara, se midió la presión media de admisión mediante una columna de mercurio conectada al colector correspondiente a la línea donde se midió el gasto de aire, en un punto muy próximo a la entrada del cilindro instrumentado con un captador piezoeléctrico para medir la presión en cámara. La señal de 1x Vuelta (disparo del sistema de adquisición de datos) se obtuvo mediante un captador magnético y se utilizó para determinar el número de ciclos de presión medidos, ya que estos se midieron en tiempo.

Con el objetivo de caracterizar las emisiones producidas en la instalación, se usaron diferentes analizadores.

Para la medida de los hidrocarburos totales se utilizó un equipo Amluk 2010uP con detector de ionización de llama. Los óxidos de nitrógeno fueron medidos mediante un equipo Beckman 951A con detector de quimioluminiscencia. Las partículas fueron recogidas en filtros de fibra de vidrio cubiertos de teflón (Pallflex T60T20) mediante un minitúnel (Nova Microtroll). Todos estos equipos se conectaron a la línea derivada de escape tal y como se muestra en la figura 1. Antes y después de la recogida de partículas, los filtros se acondicionaron en una cámara climática del tipo Minitest CCM-0/81 con el objetivo de mantener fijos parámetros de humedad y temperatura antes de ser pesados en una balanza analítica del tipo HA-202M de A&D Company Limited. La elección de parámetros tales como el tipo de filtro a utilizar para la recogida de partículas, la humedad relativa y temperatura a fijar en la cámara climática para su acondicionamiento así como el grado de dilución a emplear en el minitúnel se realizó de acuerdo a estudios previos. (Lapuerta et al, 1999), (Armas et al, 2000).

La descripción detallada de la instrumentación y la metodología empleada para la extracción de la fracción soluble de las partículas así como para su posterior análisis aparecen reflejadas en trabajos precedentes. (De Lucas et al, 1999), (Lapuerta et al, 2000).

3 Plan de ensayos

El plan de ensayos se definió atendiendo a los siguientes condicionantes:

- Este tipo de aplicación de motor esta explícitamente excluida de la directiva [3], adoptada por la Unión Europea, tanto desde el punto de vista de límites de contaminación, como del método de ensayo para evaluarlos.
- El motor esta construido antes del 1 de enero de 2000, por lo que el control de las emisiones, en el caso de que su tecnología base se use como motor marino, no está obligado a regirse por las normativas adoptadas por la IMO, ver tabla 3.
- El motor trabaja en producción de energía eléctrica a régimen de giro constante y el plan de ensayos se pretendía diseñar para llevarse a cabo durante el ciclo productivo de la empresa donde está instalado.
- Las variaciones de carga que se pretendían realizar en el motor se adaptaron a las propias características del sistema de regulación de la carga de la instalación motor – alternador.

Todas estas condiciones llevaron a proponer un plan de ensayos definido por cuatro puntos de funcionamiento estacionario a un solo régimen de giro, variando el grado de carga, tal y como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 Plan de ensayos

Régimen (min^{-1})	Carga (% de P_{MAX})
1500	95 (funcionamiento habitual del motor)
	74
	53
	32

4 Resultados obtenidos y discusión

Emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NO_x).

Debido al vacío normativo existente sobre emisiones contaminantes en motores con aplicación en generación estacionaria los resultados obtenidos en este apartado y los siguientes, se comparan con los límites mostrados en las tablas 2 y 3. Los resultados presentados son fruto del promedio de cuatro muestras tomadas en cada punto de medida.

En las figuras 2 y 4 se muestra la evolución de las emisiones de NO_x . Éstas son coherentes con el aumento de carga. Los niveles medidos son altos debido a que la inyección está bastante adelantada respecto al punto muerto superior (0 grados en la figura 3), lo que provoca un aumento de la combustión premezclada. Este tipo de combustión es responsable de los importantes gradientes de presión que se generan en el cilindro, así como del crecimiento de las temperaturas máximas, trayendo como consecuencia el aumento de las emisiones de NO_x . La aplicación de las nuevas tecnologías a parámetros de diseño y funcionamiento habituales, presentes en los motores de automoción: inyección retrasada, elevadas presiones de inyección, etc., podrían colaborar en la reducción de dichos niveles.

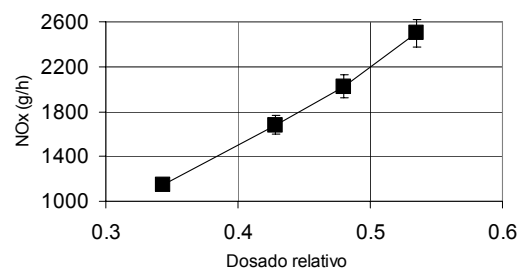


Fig. 2. Comportamiento de las emisiones de NO_x en g/h

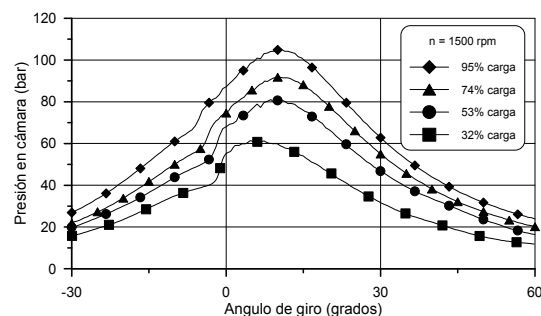


Fig. 3. Presión en cámara medida

La emisión de NO_x obtenida en g/kWh disminuye coherentemente con el aumento de la potencia tal y como se aprecia en la figura 4.

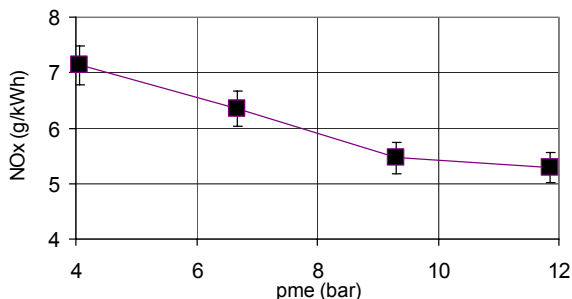


Fig. 4. Comportamiento de la emisión de NO_x en g/kWh

A partir de los resultados obtenidos, es interesante señalar que este motor cumpliría el límite propuesto para el año 2007 por la normativa adoptada por la IMO, de NO_x + THC, fijado en 7.2 g/kWh. El valor que se obtuvo para el 95% de carga (punto de funcionamiento habitual) atendiendo a la figura 4 y la figura 6 es de 6.4 g/kWh.

Asimismo, el valor de emisión de NO_x obtenido, utilizando los coeficientes de ponderación vigentes en la Unión Europea (ISO 8178) para los motores del tipo D1 montados en fuentes móviles pero no de automoción (ver tabla 2), es de 5.6 g/kWh, es inferior a los límites establecidos en la primera y segunda fase de la directiva de 9.2 y 6.0 g/kWh respectivamente.

Emisiones de Hidrocarburos Totales (THC)

Los resultados obtenidos de THC en g/h y g/kWh se muestran en las figuras 5 y 6 respectivamente, siendo coherentes con el aumento del dosado relativo y de la potencia efectiva.

A partir de los valores presentados en la figura 6 y empleando los coeficientes de ponderación antes mencionados (tabla 2), se obtiene una emisión de THC de 1.2 g/kWh. Este valor es del orden del establecido en la actualidad para las fuentes móviles (no-automoción) y mayor que el establecido para la segunda fase de dicha directiva. Los niveles de hidrocarburos totales medidos se deben a una presencia importante de hidrocarburos pesados procedentes del combustible tal y como se podrá apreciar en la figura 9 del apartado siguiente.

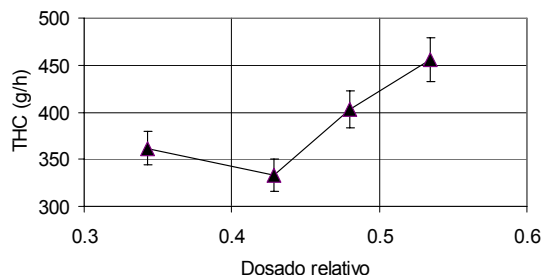


Fig. 5. Comportamiento de las emisiones de THC en g/h

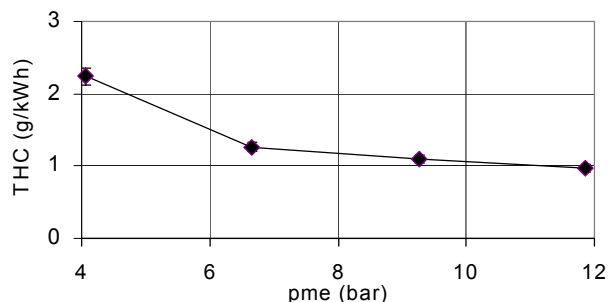


Fig. 6. Comportamiento de las emisiones de THC en g/kWh

Emisiones de partículas (PM)

En la figura 7 se presentan los valores medios de la emisión de partículas en cada uno de los puntos ensayados.

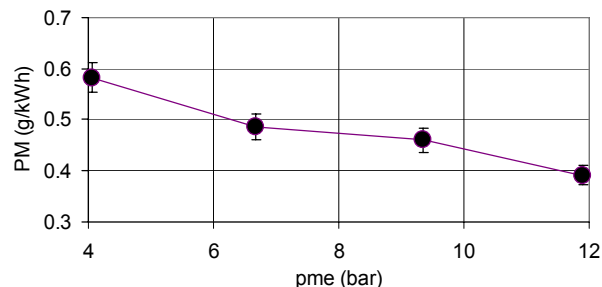


Fig. 7. Comportamiento de la emisión de partículas

El valor de la emisión de partículas, obtenido mediante ponderación, es de 0.45 g/kWh. Este valor, aunque es menor que el establecido en la tabla 2, será muy alto para la próxima fase de la normativa con inicio en el 2002, así como para la entrada en vigor del anexo VI de MARPOL en el 2007 (tabla 3).

En las figuras 8 y 9 se presenta la composición química de las partículas recogidas. En la primera se hace distinción entre la fracción soluble (SOF) y la insoluble (ISF) y en la segunda se distingue la procedencia de la SOF.

La evolución de la proporción de la SOF y la ISF de las partículas recogidas es coherente con el grado de carga. Con el aumento del grado de carga aumenta el diámetro de la partícula que viaja en el flujo de gases de escape (Armas, O. et al, 2001, Pagán, J., 1999, y Greenwood, S.J. et al., 1996), y en correspondencia, el diámetro medio de las que se recogen y se observan en los filtros cargados (Lapuerta, 2000a, 2000b). El incremento del diámetro se traduce en una disminución de la superficie de adsorción de la partícula y en consecuencia la proporción de SOF adsorbida.

Al observar la composición de la SOF (figura 9) se aprecia que la proporción de hidrocarburos procedentes del combustible es del mismo orden de magnitud que la del lubricante, oscilando ambas entre el 45 % y el 55% del total de los hidrocarburos extraídos al someter los filtros de partículas al proceso soxhlet. En motores Diesel de automoción...

ción, utilizando un lubricante muy similar, la aportación del combustible raramente sobrepasa el 30 %, tal como se documenta en las referencias (Payri et al. 2000) y (Lapuerta et al. 2000a), ya que son los hidrocarburos más pesados, procedentes del lubricante, los que mayoritariamente se adsorben en la superficie de las partículas. La mayor proporción de hidrocarburos procedentes del combustible en el presente trabajo tiene su explicación en que el combustible utilizado en este caso contiene mayor cantidad de compuestos pesados, tal como muestra el solapamiento existente entre los cromatogramas del lubricante y del combustible presentados en la figura 10. Dicho solapamiento no se observa en los cromatogramas de un combustible y un lubricante, típicos de automoción, presentados en la figura 11.

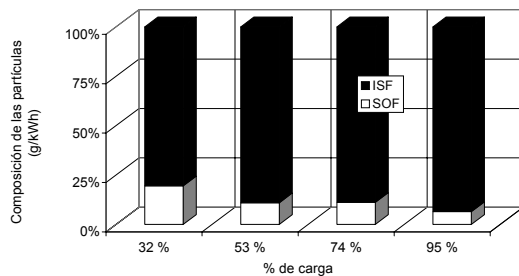


Fig. 8. Composición de las partículas

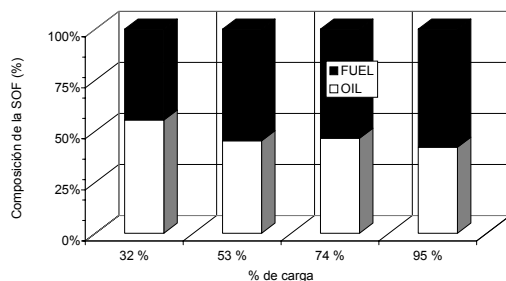


Fig. 9. Composición de la SOF

Esto demuestra que el potencial de optimización de emisiones de los motores de generación no solo depende del diseño de los motores y de sus condiciones operativas sino también del combustible con que se alimentan, cuyas exigencias actuales de calidad son también muy inferiores a las de los combustibles de automoción.

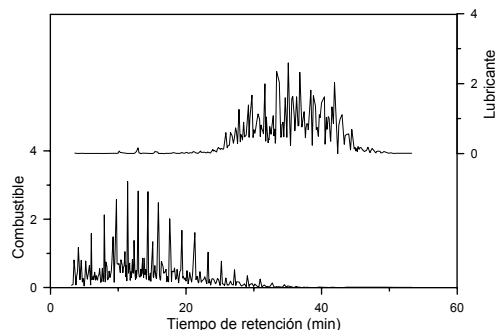


Fig. 10. Cromatogramas del combustible y el lubricante utilizados en los ensayos.

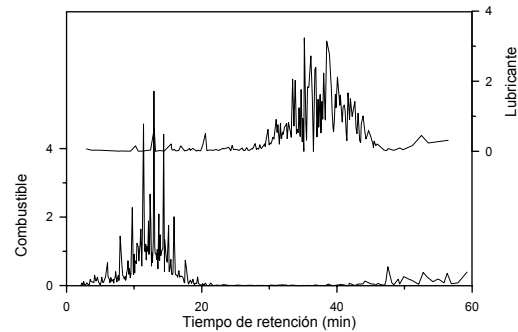


Fig. 11. Cromatogramas de un combustible y un lubricante, típicos de automoción.

5 Conclusiones

Los motores utilizados en España en instalaciones de generación y cogeneración disponen todavía de un vacío normativo, lo que hace que sus diseños dispongan de un cierto margen de optimización en cuanto a emisión de contaminantes.

Con la realización de este trabajo se ha puesto de manifiesto que dicho margen de optimización puede materializarse por medio de las siguientes líneas de actuación de demostrado efecto en el sector de la automoción:

- a) La incorporación de ciertas soluciones de diseño o puesta a punto de alguno de sus sistemas en ciertos casos, aún a costa de penalizar los consumos.
- b) La incorporación de algunas tecnologías que pueden encarecer los motores, como por ejemplo la introducción del control electrónico de la inyección o de sistemas de post-tratamiento de gases de escape.
- c) La utilización de combustibles más limpios.

La progresiva incorporación de estas soluciones deberá contribuir en el futuro a adaptar los motores de generación y cogeneración a las previsibles limitaciones legales de emisión de contaminantes.

6 Agradecimientos

Se agradece al Ministerio de Ciencia y Tecnología por el soporte financiero concedido mediante el proyecto FEDER 1FD97-1605.

Se agradece a la empresa Cerámicas Mira, S.L. por la cesión de la instalación de generación para la realización de los ensayos, así como por su apoyo técnico y acogida. Se agradece la colaboración del departamento CMT de la Universidad Politécnica de Valencia por el apoyo en la utilización de la balanza analítica y la asesoría técnica durante el desarrollo de la campaña experimental.

7 Referencias

Comunicación de la Comisión de Medio Ambiente, Industria y Energía al Consejo y Parlamento Europeos. Bruselas. 1996.

Emission Standards: European Union. Heavy-Duty Diesel Truck and Bus Engines. Directive 2000/25/EC. Official Journal L173. 12/07/2000. www.dieselnet.com.

Emission Standards: European Union. Off-Road Diesel Engines. Directive 1997/68/EC. www.dieselnet.com.

Emission Standards: USA. Marine Diesel Engine. International Convention on the Prevention of Pollution from Ships. www.dieselnet.com.

Armas, O.; Ballesteros, R. y Gómez, A. Efecto del tipo de filtro sobre las emisiones y composición de las partículas en un motor Diesel. *Anales del XIV Congreso de Nacional de Ingeniería Mecánica*, Volumen III, pp. 1895-1903. Madrid. 2000.

Armas, O.; Ballesteros, R. y Gómez, A. Morphological Analysis of Particulate Matter emitted by a Diesel Engine using Digital Image Analysis Algorithms and Scanning Mobility Particle Sizer. SAE paper 2001-01-3618. SP-1641.

De Lucas, A.; Durán, A.; Carmona, M. y Lapuerta, M. Characterization of Soluble Organic Fraction in DPM: Optimization of Extraction Method. SAE paper 1999-01-3532.

Lapuerta, M.; Armas, O.; Ballesteros, R. y Durán, A. Influence of Mini-tunnel Operating Parameters and Ambient

Conditions on Diesel Particulate Measurement and Analysis. SAE paper 1999-01-3531.

Lapuerta, M.; Armas, O.; Ballesteros, R. y Carmona, M. Fuel Formulation Effects on Passenger Car Diesel Engine Particulate Emissions and Composition. SAE paper 2000-01-1850. SP-1551.

Lapuerta, M.; Armas, O.; Hernández, J.J. y Ballesteros, R. Chemical and Morphological Analysis of Particulate Matter from Differently Fuelled Passenger Car Diesel Engine. THIESEL 2000. Thermofluidynamic Processes in Diesel Engines. Conference Proceedings. Pp 7-22. Valencia, Spain. 2000.

Lapuerta, M.; Ballesteros, R. y Gómez, A. Estimación de la distribución de tamaños de partículas recogidas en minitúnel de dilución de motores Diesel mediante tratamiento digital de imágenes. *Anales del XIV Congreso de Nacional de Ingeniería Mecánica*, Volumen III, pp. 1921-1930. Madrid. 2000.

Payri, F. Zubía, P. y Ballesteros, R. Effect of Fuel Composition on Particulate and Atmospheric Emissions of a Direct Injection Diesel Engine. EC/ EUROTRAC-2 JOINT WORKSHOP "Chemical Mechanism Development". Lausanne-Ecublens, Switzerland. September, 2000.