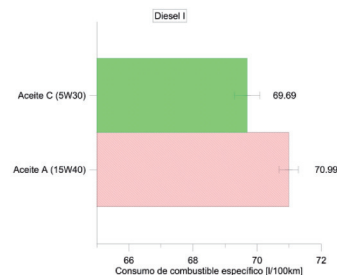


Aceites de motor de baja viscosidad: ahorro de combustible y ensayos en condiciones reales

Low viscosity engine oils: Fuel economy and performance in a real-world fleet test



Bernardo Tormos-Martínez¹, Guillermo Miró-Mezquita¹, Tomás Pérez-Gutiérrez² y Javier de-Diego-Pardo²

¹ Universitat Politècnica de València. Camí de Vera, s/n – 46022 València. Tfno: +34 963 877650

² Centro de Tecnología de Repsol (CTR). Ctra. Extremadura, A-5, Km. 18 – 28931 Móstoles (Madrid). Tfno: +34 917 53 76 00

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7974> | Recibido: 22/02/2016 • Aceptado: 05/06/2016

ABSTRACT

- CO₂ emissions and fuel consumption reduction in road transportation have become one of the most relevant concerns in automotive industry, led mainly by global warming. A variety of solutions has arisen to overcome this challenge, varying in technical complexity, implementation costs and terms. Among them, one proven cost-effective way to reduce fuel consumption is the use of low viscosity oils (LVO). There are different studies involving LVO and ICE, but currently limited data are available regarding "real-world" performance of LVO. This paper presents a study where the effect of the use of LVO on urban buses regarding fuel consumption and oil performance is assessed. A comparative analysis using 39 buses was performed, based on an extensive fuel consumption control and oil analysis program to assess aspects aforementioned. 2 engine technologies (Diesel / CNG) were considered and 4 different lubricants. Test duration comprised 2 oil drain intervals, totalizing more than 2 million of km accumulated. The results have shown that LVO have benefits in terms of fuel economy, closely linked to the engine design. On the other hand, they presented an excellent performance during oil drain interval, even improving some characteristics of the reference oils used, without penalty in terms of reducing the oil lifespan, a key indicator for end users related maintenance costs.
- Keywords:** Lubrication, ICE, Low viscosity oils, fuel economy, engine wear.

RESUMEN

Debido al fenómeno del calentamiento global, las emisiones de CO₂ y la reducción del consumo de combustible en el transporte por carretera se han convertido en algunas de las preocupaciones más relevantes en el sector de la automoción. Todo este proceso ha hecho aparecer una variedad de soluciones técnicas de diferente complejidad tanto en costes de implementación como de mejora relativa. Dentro de todas ellas, una de las soluciones con una mejor relación coste-beneficio para reducir el consumo de combustible es el uso de aceites de baja viscosidad (LVO). Existen diferentes estudios con LVO en motores de combustión interna alternativos (MCIA), pero actualmente se dispone de datos limitados respecto al rendimiento en el uso de calle de estos. Este trabajo presenta un estudio en el que se evaluó el efecto de la utilización de LVO en una flota de autobuses urbanos en relación con el consumo de combustible y el rendimiento de aceite. Se realizó un análisis comparativo con 39 autobuses, mediante un amplio pro-

grama de control del consumo de combustible y análisis de aceite para evaluar los aspectos antes mencionados. Se evaluaron dos tecnologías de motores (Diésel / GNC) y 4 lubricantes diferentes, durante 2 intervalos de cambio de aceite, contabilizando más de 2 millones de kilómetros acumulados.

Los resultados han demostrado que estos aceites presentan beneficios en términos de ahorro de combustible, pero estrechamente vinculados al diseño del propio motor. Por otro lado, han presentado un excelente desempeño a lo largo del período de cambio de aceite, incluso mejorando algunas características de los aceites de referencia utilizados y sin penalización en términos de reducción del intervalo de cambio, indicador clave para los usuarios finales relacionados con los costes de mantenimiento.

Palabras clave: Lubricación, Motores de Combustión Interna Alternativos, Aceites de baja viscosidad, Ahorro de combustible, desgaste del motor.

1. INTRODUCCIÓN

Durante el desarrollo del motor de combustión interna alternativo (MCIA), la mejora de su rendimiento efectivo ha sido un tema principal de investigación; en primera instancia, para mejorar las prestaciones de éste y más recientemente, para hacer frente al reto de la reducción de los gases de escape contaminantes para el medio ambiente y el impacto negativo que producen. Este trabajo de desarrollo se ha venido realizando desde dos perspectivas diferentes [1]; la primera, basada en optimizar los procesos termodinámicos para aumentar la potencia generada dentro de la cámara de combustión, y la segunda, basada en incrementar el rendimiento mecánico del motor mediante la reducción de las pérdidas mecánicas.

Cabe resaltar que, por ejemplo, para un automóvil trabajando en condiciones normales, el porcentaje de energía que se consigue transmitir hasta las ruedas de todo el contenido en el combustible es únicamente entre un 15% y 20% [2]. Si se tiene en cuenta que la fricción interna del motor puede llegar a ser el 50% del total de las pérdidas mecánicas en un motor de combustión interna, en esta área de trabajo existe un nicho donde poder llevar a cabo avances que contribuyan de forma significativa al ahorro de combustible.

Para ello, existen diferentes enfoques de aproximación centrados en la reducción de las pérdidas mecánicas en los MCIA, los cuales engloban diferentes ámbitos de la ingeniería mecánica, tales como: el diseño y la fabricación de piezas más ligeras, cam-

bio de materiales típicos por otros de menor peso que ofrezcan características similares a los materiales reemplazados, mejoras en los acabados superficiales de los pares en desplazamiento relativo, "downsizing" de las plantas motrices y el uso de aceites de baja viscosidad, entre otros. Sin embargo, el uso de aceites de baja viscosidad presenta una ventaja comparativa debido a su excelente ratio de coste de implementación frente a beneficio obtenido, tal y como se muestra en la Figura 1.

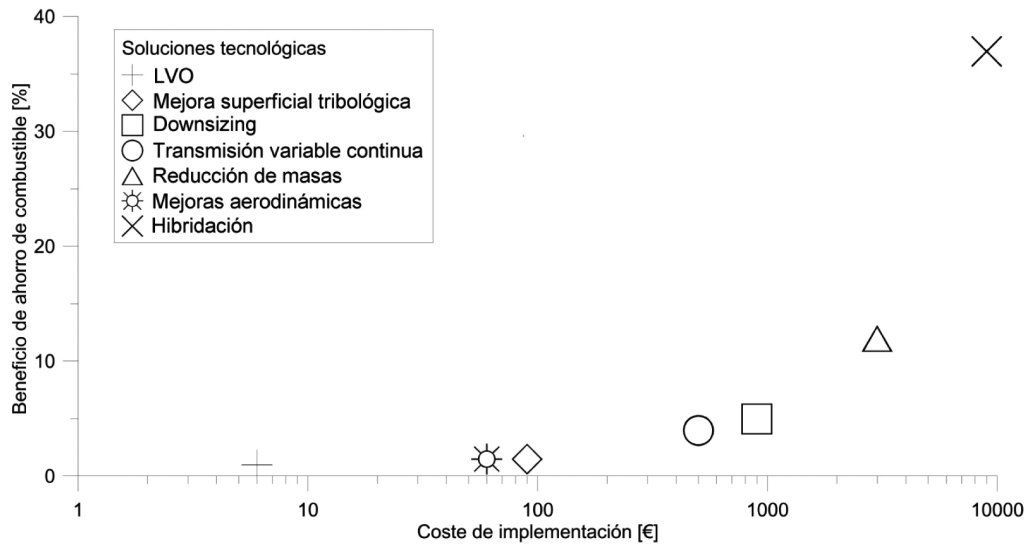


Figura 1: Relación entre coste de implementación y beneficio de ahorro de combustible para diferentes soluciones tecnológicas. Adaptado de [3]

Durante las pasadas décadas, se realizaron varios estudios tanto en motores de encendido provocado (MEP) [4]–[6], como en motores de encendido por compresión (MEC), especialmente en el segmento de vehículos de turismo [7].

La reducción promedio en el consumo de combustible en estos estudios ha variado entre un 1% y un 5% dependiendo de diferentes factores tales como: puntos concretos de operación del motor, formulaciones específicas de aceites utilizados, temperaturas de funcionamiento, etc [8], [9]. Los resultados derivados de estas pruebas influyeron en un cambio del marco normativo, donde la viscosidad promedio de los aceites utilizados se ha bajado noto-

riamente durante las últimas décadas. Así, los aceites SAE 10W40 y 15W40, tan comunes a finales del siglo anterior, han sido desplazados paulatinamente por aceites SAE 10W30 y 5W30 durante los últimos años [10]. A día de hoy ya es muy común encontrar vehículos de pasajeros cuya carga inicial de lubricante se realiza con un aceite SAE 5W30.

Sin embargo, estos estudios han sido realizados mayoritariamente en condiciones de laboratorio y sobre motores de trabajo ligero. A día de hoy, la Asociación de Constructores Europeos de Automóviles (ACEA), entidad que define los estándares de la industria de automoción a nivel europeo, aún no define ninguna prueba de ahorro de combustible para los aceites destinados a vehículos Diésel de trabajo pesado [11]. Ante las futuras restricciones de consumo de combustible para los vehículos de trabajo medio y pesado, el uso de aceites lubricantes de baja viscosidad representa una oportunidad de bajo costo de implementación tal como se ha visto y que puede contribuir en una magnitud no despreciable a los porcentajes finales de ahorro exigidos en las normativas. Por todo ello, se han

realizado estudios teóricos y en banco de ensayos para poder estudiar las posibles consecuencias del uso de los aceites baja viscosidad en motores de carga pesada, tanto centrados en el consumo de combustible [12], [13], como en aspectos tribológicos [14]–[16].

Después de analizar toda la información recibida, se planteó un estudio en flota, en comportamiento real, para evaluar el uso de aceites de baja viscosidad en motores de trabajo pesado como método efectivo para aumentar la eficiencia en el uso de combustible, de manera que sirva de referencia para fabricantes de vehículos, formuladores de lubricantes, entidades reguladoras y usuarios finales a la hora de tomar decisiones sobre el tipo de

Modelo	Diésel I	Diésel II	Gas I	Modelo	Diésel I	Diésel II	Gas I
Nivel de emisiones	Euro IV	Euro V	EEV	Combustible	Biodiésel 10%	Biodiésel 10%	Gas natural
Año compra	2008	2010	2007	Volumen cárter [l]	31	29	33
Longitud/ anchura/altura [m]	17.94/ 2.55/3	11.95/ 2.55/3	12/2.5/ 3.3	Presión media efectiva [bar]	18.3 @ 1000 rpm	13.5 @ 1000 rpm	12 @ 1000 rpm
Peso vehículo [Tm]	17.5	12.7	12.1	Carga térmica [W/mm²]	2.85	3.97	2.33
Capacidad de pasajeros sentados/pie	45/95	25/60	30/63	Sobrealimentado	Turbo + Intercooler	Turbo + Intercooler	Turbo + Intercooler
Cilindrada total [c.c.]	11967	7200	11967	EGR [-]	NO	NO	-
Certificación emisiones	EURO IV	EURO V	EEV	Configuración del árbol de levas	OHV	OHV	OHV
Número de cilindros	6	6	6		Roller follower	Cam follower	Cam follower
Potencia máxima [kW]	220 @ 2200 rpm	210 @ 2200 rpm	180 @ 2200 rpm	Autobuses referencia	5	5	10
Par máximo [Nm]	1600 @ 1100 rpm	1100 @ 1100 rpm	880 @ 1000 rpm	Autobuses candidatos	4	5	10

Tabla 1: Descripción de los modelos de autobuses utilizados en la prueba

aceite a utilizar en un motor. Sin embargo, en este estudio también sería necesario realizar una valoración de potenciales consecuencias negativas que se podrían derivar del uso de estos aceites de baja viscosidad. La disminución de viscosidad va a modificar sustancialmente el comportamiento tribológico de los pares, así como del lubricante y por tanto, de las posibles acciones de mantenimiento derivadas de estas variaciones [12]. Por ello, durante el desarrollo del presente estudio se realizó un profundo seguimiento en paralelo del propio estado del aceite y del desgaste del motor a lo largo de la propia vida útil del aceite en uso.

2. DEFINICIÓN Y DESARROLLO DE LA PRUEBA

El fundamento de este estudio es de tipo comparativo, para lo que se propuso realizar una prueba de larga duración en la que se comparará el consumo de combustible de un grupo de autobuses de control usando aceites comerciales de grado SAE estándar, con un grupo de autobuses equivalentes utilizando un aceite de tipo LVO. Los autobuses urbanos presentan características muy adecuadas para el desarrollo de esta prueba, ya que los trayectos realizados diariamente son iguales, y el ciclo de funcionamiento del motor es bastante repetitivo, con un ciclo de funcionamiento que se denomina ciclo del trapecio [17]. Evidentemente, existen un gran número de variables que pueden afectar al consumo durante el servicio real; que son cuantificables, pero difícilmente evaluables: las condiciones ambientales (presión atmosférica, tiempo, estación del año), las condiciones de la ruta (pendiente, velocidad media, etc.), y las variables específicas del servicio de los autobuses (tráfico urbano, número de pasajeros, peso del vehículo, resistencia a la rodadura, tipo de motor, etc.). Estas variables posiblemente enmascaren el efecto de la viscosidad del aceite sobre el consumo de combustible del autobús, por lo que se consideró crucial llevar a cabo un periodo largo de pruebas con el fin de establecer un valor de consumo de combustible estadísticamente significativo. Además, se intentaron controlar las diferentes variables posibles,

realizando la prueba durante el mismo periodo temporal para los dos grupos y realizando los mismos recorridos correspondientes.

Con el objetivo de maximizar los resultados obtenidos de la prueba planteada y obtener una muestra representativa de una flota de autobuses urbanos común se escogieron tres modelos diferentes de autobús, con diferentes tecnologías de motorización: diésel y gas natural comprimido (GNC), y de estándares de emisiones. En la Tabla I, se encuentran los datos principales de cada uno de los autobuses.

Debido a la elección de estos motores y las especificaciones de aceites demandadas por el propio fabricante, se propuso realizar una doble combinación de aceites, con las características mostradas en la Tabla II.

Para el cálculo de los consumos de combustible, se realizó un control diario del kilometraje del autobús y los litros de combustible consumido. La distancia recorrida se midió a través del sistema de GPS que equipan y por otro lado el combustible consumido se obtuvo a partir de los datos de repostaje automatizado de combustible diésel y gas natural comprimido, obtenidos a través del sistema de gestión informática de la flota. También se realizó un control de los rellenos del aceite al motor, mediante los informes de reposición. Tal y como se ha señalado anteriormente, fue necesario tomar una gran cantidad de datos con el fin de asegurar que las diferencias mínimas en el consumo de combustible pudieran ser observadas; teniendo esto en cuenta, se completaron dos fases completas de 30000 km por autobús, correspondientes a dos cambios de aceite. Los resultados obtenidos fueron analizados mediante el procedimiento estadístico ANOVA (con un intervalo de confianza al 95%) para asegurar la representatividad estadística.

En paralelo se planteó realizar un seguimiento del estado del sistema lubricado mediante técnicas de análisis de aceite. Además de realizar un control cuantitativo de los rellenos de aceite utilizados, se analizaron para cada autobús 10 muestras equidistantes a lo largo del periodo de cambio, y se aplicaron diferentes técnicas analíticas, entre las que se muestran en la Tabla III.

	Aceite A	Aceite B	Aceite C	Aceite D
Tipo	Aceite Diésel I referencia	Aceite Diésel II/Gas I referencia	Aceite Diésel I / II candidato LVO	Aceite Gas I candidato LVO
Grado SAE	15W40	10W40	5W30	5W30
Densidad@15°C [g/cm ³]	0,887	0,859	0,861	0,855
Viscosidad@40°C [cSt]	108	96	71	68
Viscosidad@100°C [cSt]	14,5	13,4	12,10	11,7
Índice de viscosidad [-]	>141	>145	>158	<169
Viscosidad HTHS@150°C [mPa·s]	4,082	3,853	3,594	3,577
TBN [mgKOH/g]	10	10	16	10
API Base del aceite	API G-I	API G-III	API G-III + G-IV	API G-III + G-IV
Secuencia ACEA del aceite	ACEA E7/E5	ACEA E6/E4	ACEA E7/E4	ACEA E6/E7/E9

Tabla II: Características de los aceites de los modelos de autobuses utilizados en la prueba

Parámetro	Técnica/Equipo	Norma
Viscosidad cinemática @100°C	Viscosímetro capilar	ASTM D-445
Oxidación	Espectrómetro FT-IR A2 Technologies IPAL	Metodología propia basada en ASTM D-7214 [18]
Metales desgaste	Espectrómetro ICP-OES Thermo iCAP 7400	ASTM D-5185

Tabla III: Técnicas analíticas aplicadas al aceite lubricante

Una vez obtenidos todos los resultados, se realizó también un estudio económico y medioambiental básico de la aplicación de esta alternativa de uso de aceites LVO, como ejemplo de cuantificación de los beneficios asociados, y la posible mejora medioambiental asociada a esta reducción de consumo.

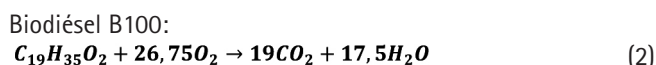
2.1. ESTUDIO TEÓRICO DE EMISIONES DE CO₂

Se propuso un modelo simplificado de emisiones mediante un balance estequiométrico con el objetivo de cuantificar la disminución de las emisiones de CO₂ debido al uso de aceites de baja viscosidad.

Los dos combustibles utilizados en la prueba fueron B10 y GNC, así que se estimó la composición elemental de estos combustibles para realizar el cálculo. La estimación realizada fue, para cada combustible:

- Diésel: C₁₂H₂₂
- Biodiésel B100: C₁₉H₃₅O₂
- GNC: CH₄

Para cada uno de estos combustibles, las reacciones de combustión se definen como:



Por lo tanto las emisiones estequiométricas de CO₂ por g de combustible son:

- Diésel: 3,18 g_{CO₂}/g_{combustible}
- Biodiésel B100: 2,83 g_{CO₂}/g_{combustible}

- GNC: 2,75 g_{CO₂}/g_{combustible}

Y utilizando valores promedios de las diferentes normas de los combustibles, se obtienen las densidades siguientes:

- Diésel: 835 g/l @ 15 °C
- Biodiésel B100: 880 g/l @ 15 °C
- GNC: 1098 kg/Nm³ @ 25 °C

Con los valores dados, las emisiones en servicio de CO₂ equivalente para un consumo determinado de combustible se podrían calcular a través de la siguiente ecuación:

$$Emisiones\ CO_2 \left[\frac{g}{km} \right] = consumo\ combustible \left[\frac{l}{100km} \right] \times densidad\ comb. \left[\frac{g}{l} \right] \times equivalencia\ CO_2 \times \frac{1}{100}$$

3. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la prueba. En primer lugar, se muestran los resultados de consumo de combustible obtenidos para los tres modelos operativos en la prueba, dependiendo del aceite utilizado, en la Figura 2.

Se observa en todos los casos una reducción en el consumo específico de combustible debido al uso de aceites de baja viscosidad, aunque en el caso de los modelos Diésel II, no se ha obtenido una significación estadística suficiente. Los valores relativos de descenso de consumo: 3,7% para los Gas I; 1,98% para los Diésel I y 0,98% para los Diésel II muestran una clara correlación entre el propio diseño del motor (en términos de carga térmica y mecánica soportada) y los ahorros obtenidos.

Con los consumos obtenidos, se realizó un estudio teórico de la disminución de las emisiones de CO₂ específicas, obteniendo los siguientes resultados tal y como se observa en la Tabla IV.

De acuerdo con las reducciones de consumo, se observa una disminución paralela en las emisiones contaminantes teóricas de CO₂.

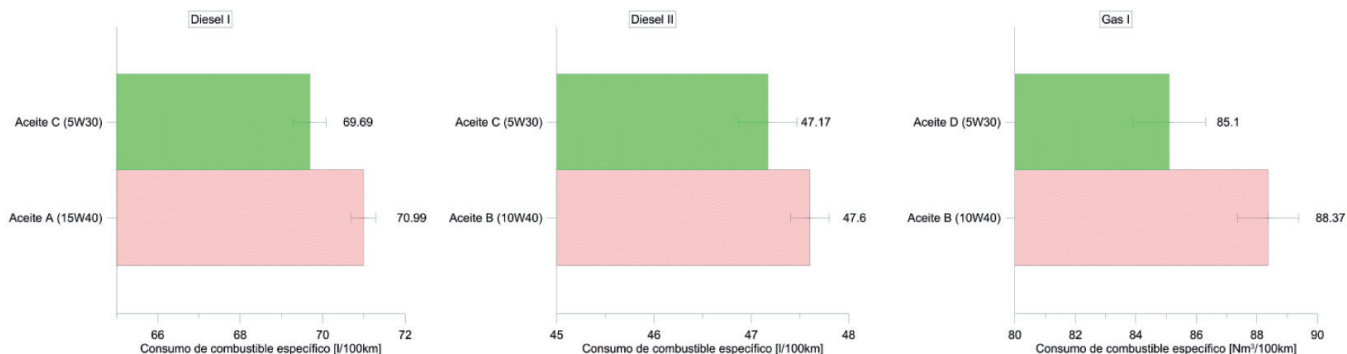


Figura 2: Resultados de consumo de combustible promedio para cada tecnología de motorización y autobús

Modelo	Combustible utilizado	Disminución de las emisiones de CO ₂ específicas [g/km]
Diésel I	Biodiésel 10%	34,29
Diésel II	Biodiésel 10%	11,35
Gas I	Gas natural	70,14

Tabla IV: Reducción en las emisiones de dióxido de carbono para cada tecnología de motorización con el uso de aceites de baja viscosidad

Asimismo, durante el desarrollo de la prueba se monitorizó el consumo de aceite de cara a comprobar si podía haber algún efecto negativo en el mismo, obteniendo los siguientes resultados, mostrados en la Tabla V.

Durante el desarrollo de la prueba se han observado valores típicos de consumos de aceite en los autobuses, tanto en los aceite referencia como en los candidato. Cabe señalar que los resultados históricos presentaban una variabilidad normal en la

que se pudieron englobar los resultados obtenidos, por lo que no se puede considerar que los rellenos de aceite varíen debido al uso de LVO.

En todo caso, el consumo de aceite es ligeramente menor para todas las motorizaciones en el caso de los LVO.

Tal y como se explica en el desarrollo de la prueba, se realizaron tomas de muestras con el objetivo de controlar diferentes parámetros específicos del aceite que ayudaran a estudiar el comportamiento tribológico de éste. Como variable crucial en el sistema se midió la viscosidad cinemática a 100°C del aceite a lo

largo de todo el período de uso del aceite. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla VI.

En los resultados referentes a la viscosidad cinemática se ha observado una dependencia importante en las tendencias según la motorización del vehículo. En el caso de los aceites utilizados en Diésel se observa una caída de la viscosidad con el uso, relacionada con el cizallamiento de los aditivos mejoradores de viscosidad. Mientras, en el caso de los vehículos Gas I se observa un aumento neto de ésta, posiblemente como consecuencia de una mayor degradación térmica del aceite que provoca la aparición de subpro-

Modelo	Consumo de aceite histórico del modelo [l aceite/100km] [mínimo, rango intercuartílico central, máximo]	Consumo de aceite referencia en la prueba [l aceite/100km]	Consumo de aceite candidato en la prueba [l aceite/100km]
Diésel I	MÍN: 0,4 / Q25: 0,8 / Q75:3,6 / MÁX: 6,5	4,2 (15W40)	3,7 (5W30)
Diésel II	MÍN: 0,5 / Q25: 1,7 / Q75:4,1 / MÁX: 7,5	4,1 (10W40)	2,9 (5W30)
Gas I	MÍN: 0,4 / Q25: 5,7 / Q75:10,4 / MÁX: 19	9,1 (10W40)	8,9 (5W30)

Tabla V: Consumos de aceites de los modelos utilizados en la prueba de LVO

Modelo	Aceite utilizado	Viscosidad inicial @100 °C [cSt]	Viscosidad final a 30000 km @100 °C [cSt]	Variación [%]
Diésel I	Aceite A (15W40)	14,5	12,71	-12,3%
	Aceite C (5W30)	12,10	11,24	-7,1%
Diésel II	Aceite B (10W40)	13,40	13,08	-2,4%
	Aceite C (5W30)	12,10	11,89	-1,7%
Gas I	Aceite B (10W40)	13,40	14,11	5,3%
	Aceite D (5W30)	11,70	13,23	13,1%

Tabla VI: Resultados de la medida de viscosidad cinemática a 100°C, clasificados según motorización y aceite utilizado

Modelo	Aceite utilizado	Tasa desgaste Fe [ppm/30000 km]	Tasa desgaste Cu [ppm/30000 km]	Tasa desgaste Pb [ppm/30000 km]
Diésel I	Aceite A (15W40)	20,1	20,1	3,9
	Aceite C (5W30)	20,3	6	0,9
Diésel II	Aceite B (10W40)	45	4,5	22,5
	Aceite C (5W30)	90	2,1	0,9
Gas I	Aceite B (10W40)	32,4	4,95	28,95
	Aceite D (5W30)	13,5	2,1	2,55

Tabla VII: Resultados relativos a la tasa de desgaste de metales representativos clasificados según motorización y aceite

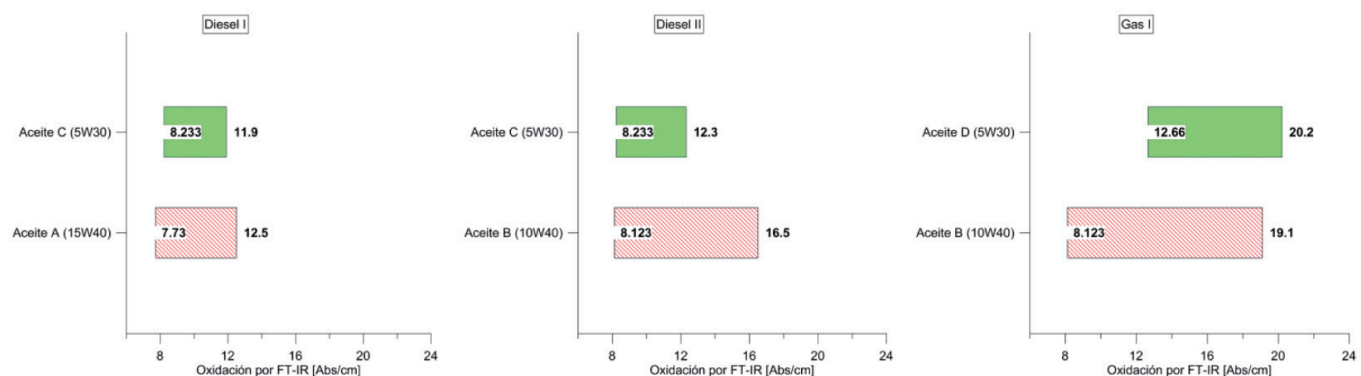


Figura 3: Valores iniciales y finales de oxidación a lo largo de la vida útil del aceite (30000 km), clasificados según motorización y aceite utilizado

Datos técnicos de la flota	Gas I		Diésel I	
	Datos del aceite referencia	Datos del aceite LVO	Datos del aceite referencia	Datos del aceite LVO
Volumen cárter [l]	33	33	30	30
Volumen rellenado [l/1000km]	0,91	0,89	0,42	0,37
Precio promedio combustible	0,819 (€/m ³)		1,1 (€/l)	
Consumo (m ³ /100km ó l/100km)	80	77,04	75	73,5
Coste promedio superior LVO vs Ref. [€/l]	1		1	
Kilometraje medio anual [km]	45000	45000	45000	45000
Período cambio aceite [km]	30000	30000	30000	30000
Porcentaje biodiésel [%]	-		10	
Ahorro esperado [%]	3,7		1,98	
Gasto combustible total [€/año]	29484	28393,09	37125	36389,93
DGasto aceite [€/año]	+79,88		+60,75	
Variación coste combustible [€/año]	-1090,91		-735,08	
Ahorro total anual [€]	1011,03		674,32	
Disminución emisiones CO ₂ anual [kg]	2815,58		1569,72	

Tabla VIII: Resultados del estudio económico de la prueba de aceites LVO

ductos de mayor viscosidad.

Como medida general del estado de la degradación del aceite, se ha medido a lo largo de la vida del aceite la presencia de compuestos de oxidación mediante FT-IR. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3, donde se pueden observar los valores iniciales y finales de cada una de las categorías estudiadas en la prueba.

De los resultados obtenidos se desprende que el aceite presenta un comportamiento dependiente de la tecnología de motorización y del propio aceite en sí. Los resultados corroboran la hipótesis anterior donde los aceites utilizados en los vehículos Gas I presentan una mayor oxidación, posiblemente contribuyendo al aumento de viscosidad. Dependiendo de la calidad del aceite, sus aditivos y de la carga termo-mecánica de cada motor, los aceites alcanzan unos valores de oxidación diferentes.

Por último, se presentan resultados de los ratios de generación de determinados metales en el aceite, medidos mediante espectrometría ICP. Se muestran los metales que han presentado resultados interesantes para la prueba en la Tabla VII.

Los resultados mostrados, al igual que en la oxidación presentan tendencias muy marcadamente dependientes tanto de la motorización del vehículo como del aceite. En el caso de los motores EURO V, se observa un aumento de la tasa de desgaste de hierro debida a la bajada de la viscosidad y a la consiguiente variación en las condiciones tribológicas en el MCI. En cambio, los resultados obtenidos en los metales blandos como pueda ser cobre o plomo presentan una relación mayor con la composición del aceite y sus propiedades de control del desgaste corrosivo. En todos los casos, los valores obtenidos entran dentro de los valores admisibles en estos tipos de motores.

Después de validar todos los resultados obtenidos en la prue-

ba, se decidió realizar un estudio económico sencillo con el fin de valorar la calidad de la inversión desde un punto de vista de gestión del mantenimiento, y de ofrecer argumentos económicos junto con los argumentos medioambientales y de cumplimiento de emisiones. El resultado de este estudio para un solo autobús se muestra en la Tabla VIII.

Los resultados de este estudio demuestran que la aplicación de aceites de baja viscosidad es una alternativa de uso sostenible económicamente, ya que es rentable desde el primer año de su utilización, y su rentabilidad es función del margen de ahorro de combustible que se obtenga, evidentemente. Además, hay que añadir a esta mejora económica de ahorro de combustible, la difícil valoración económica del consiguiente ahorro medioambiental.

4. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de esta prueba, se ha podido demostrar fehacientemente que los aceites de baja viscosidad son un medio que puede contribuir a reducir el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ en autobuses de servicio urbano. Se realizaron recorridos por un total de casi 2 400 000 km, en los cuales los consumos de combustible promedio de autobuses que usaron aceites con grado de viscosidad SAE 5W30 (considerados LVO) fue menor que en autobuses iguales que usaron aceites con grado de viscosidad SAE 10W40 y SAE 15W40, excepto en uno de los casos por falta de significación estadística. Sin embargo, las potenciales mejoras obtenidas con el uso de LVO dependen en gran parte del diseño del motor y de su carga termo-mecánica, por lo que a la hora de valorar o estimar un porcentaje de ahorro con el cambio de aceite es necesario comprobar la idoneidad de la aplicación en el motor específico considerado.

Por otro lado, y a la vista de los resultados obtenidos en la prueba, se ha demostrado que todos los aceites han cumplido satisfactoriamente con las funciones requeridas durante la prueba. Han soportado satisfactoriamente el período de vida (período de cambio de aceite) estipulado, y no han presentado ningún problema crítico de funcionamiento. Referente al consumo de aceite durante el ciclo de funcionamiento, no es posible afirmar que exista diferencia significativa entre uso de un aceite de baja viscosidad frente a un aceite referencia en ninguna de las tres motorizaciones presentadas, y además los valores de relleno se encuentran dentro del rango habitual de funcionamiento de cada tecnología utilizada en la prueba. Las diferentes propiedades físico-químicas del aceite medidas en esta prueba han evolucionado de acuerdo a las características propias de los aceites y los motores, sin suponer en ningún caso un comportamiento anómalo; incluso mejorando en el caso de los aceites C y D, considerados de baja viscosidad. Estas formulaciones, debido a su tecnología sintética y a su mejora de la aditivación, podrían permitir un aumento del intervalo del período de cambio y optimizar el mantenimiento de una flota de vehículos pesados, aunque esta hipótesis necesitaría de resultados de comprobación.

Por último, se ha realizado un estudio económico preliminar que ha señalado la bondad de la inversión en la aplicación de LVO, ya que desde el primer año se tiene un retorno económico positivo, además de un retorno medioambiental estimado asociado a la disminución de emisiones relacionadas con el menor consumo de combustible.

BIBLIOGRAFÍA

[1] F. Payri and J. M. Desantes, *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Barcelona: Reverté, 2011.

[2] K. Holmberg, P. Andersson, and A. Erdemir, "Global energy consumption due to friction in passenger cars," *Tribol. Int.*, vol. 47, pp. 221–234, Mar. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2011.11.022>.

[3] T. Miller, "North American Fuel Economy Testing," in *15th Annual Fuels & Lubes Asia Conference*, 2009.

[4] A. Yaguchi and K. Inoue, "Development and Field Test Performance of Fuel Efficient SAE 5W-20 Oils," *SAE Technical Paper*, no. 952341, 1995. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/952341>.

[5] K. Fukuo, A. Fujimura, M. Saito, K. Tsunoda, and S. Takiguchi, "Development of the ultra-low-fuel-consumption hybrid car-INSIGHT," *JSAE Rev.*, vol. 22, pp. 95–103, 2001.

[6] S. I. Tseregounis and M. L. Mcmillan, "Engine Oil Aging Effects on Fuel Economy as Measured by the EPA FTP Vehicle Dynamometer Test in a GM Engine," *SAE Technical Paper*, no. 2002-01-1635, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2002-01-1635>.

[7] M. J. Souza de Carvalho, P. Rudolf Seidl, C. R. Pereira Belchior, and J. Ricardo Sodré, "Lubricant viscosity and viscosity improver additive effects on diesel fuel economy," *Tribol. Int.*, vol. 43, no. 12, pp. 2298–2302, Dec. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2010.07.014>.

[8] R. I. Taylor and R. C. Coy, "Improved fuel efficiency by lubricant design: A review," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 214, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/135065010021400101>.

[9] S. Korcek, *Engine Oil Fuel Efficiency - Practical Issues*, Proceedings of the 24th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, vol. 34. Elsevier, 1998. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8922\(98\)80059-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8922(98)80059-X).

[10] M. J. Covitch, M. Brown, C. May, and T. W. Selby, "Extending SAE J300 to Viscosity Grades below SAE 20," *SAE Technical Paper*, no. 2010-01-2286, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2010-01-2286>.

[11] ACEA, "ACEA 2012 Oil Sequences," vol. 10, no. 32, pp. 1–15, 2012.

[12] W. van Dam, P. Kleijwegt, M. Torremán, and G. Parsons, "The Lubricant Contribution to Improved Fuel Economy in Heavy Duty Diesel Engines," *SAE Technical Paper*, no. 2009-01-2856, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2009-01-2856>.

[13] W. van Dam, T. Miller, and G. Parsons, "Optimizing Low Viscosity Lubricants for Improved Fuel Economy in Heavy Duty Diesel Engines," *SAE Technical Paper*, no. 2011-01-1206, Apr. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2011-01-1206>.

[14] P. Carden, C. Pisani, J. Andersson, I. Field, E. Lainé, J. Bansal, and M. Devine, "The Effect of Low Viscosity Oil on the Wear, Friction and Fuel Consumption of a Heavy Duty Truck Engine," *SAE Technical Paper*, vol. 6, no. 2013-01-0331, pp. 311–319, Apr. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2013-01-0331>.

[15] W. Van Dam, M. W. Cooper, K. Oxorn, and S. Richards, "Observations from Cylinder Liner Wear Studies in Heavy Duty Diesel Engines and the Evolution towards Lower Viscosity Heavy Duty Engine Lubricants," *SAE Technical Paper*, no. 2011-01-1207, Apr. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2011-01-1207>.

[16] M. J. Plumley, V. Wong, M. Molewyk, and S. Park, "Optimizing Base Oil Viscosity Temperature Dependence For Power Cylinder Friction Reduction," *SAE Technical Paper*, no. 2014-01-1658, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2014-01-1658>.

[17] K. Schubert, H. Drewitz, and P. Von Korff, "Optimization of the drive train of city buses," *Int. J. Veh. Des.*, vol. 9, no. 1, pp. 67–84, 1988. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJVD.1988.061507>.

[18] V. Macián, B. Tormos, P. Olmeda, and Y. A. Gómez, "Findings from a fleet test on the performance of two engine oil formulations in automotive CNG engines," *Lubr. Sci.*, vol. 27, pp. 15–28, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/ls.1248>.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación por su financiación en este proyecto (Proyecto TRA2012-30907), y la EMT de València por su colaboración. Además, los autores desean agradecer a Leonardo Ramírez, Lorena Garzón, Santiago Ballester y Andrés Carrión su ayuda y colaboración en este trabajo.