

COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN MOTOR

operado con biodiésel proveniente de diversas materias primas

COMPARISON OF MOTOR PERFORMANCE USING

Biodiesel from Different Raw Materials

AUTORES



John Ramiro Agudelo

Grupo GIMEL, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Antioquia (Colombia)

Magín Lapuerta

José Rodríguez

Grupo Combustibles y Motores, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Castilla – La Mancha (España)

Palabras CLAVE

Biodiésel, ensayos en motor, aceite de palma.

Biodiesel, motor performance, palm oil.



RESUMEN

En este trabajo se muestra la importancia que tiene el biodiesel, independientemente de la fuente a partir de la cual se elabore, y cómo se afectan sus propiedades de acuerdo con las del aceite que se utilice como materia prima; posteriormente se muestra la batería de combustibles ensayados y algunas propiedades relevantes que pueden influir en el precio final del producto; igualmente se muestra que el biodiesel, independientemente de la materia prima de procedencia, mientras cumpla estándares de calidad, no presenta diferencias importantes en las principales variables de funcionamiento del motor.

SUMMARY

This work shows the importance of biodiesel and how its properties change depending on the type of oil used as raw material. It also shows the range of fuels that have been tested and some relevant properties that may have affect the final price of the product. It also demonstrates that the different types of raw materials used to produce biodiesel, as long as they comply with quality standards, do not produce important differences in terms of the main operational variables of engines.

INTRODUCCIÓN

El biodiésel es un combustible alternativo de origen renovable (alquiléster) producido a partir de aceites vegetales, grasas recicladas o grasas animales, mediante un proceso de transesterificación. No obstante, tal definición se queda corta si ese combustible no cumple determinadas normas técnicas. Las normas técnicas se pueden presentar de dos maneras, en la tabla 1 se muestran las exigencias relacionadas con las propiedades físico-químicas que ha de cumplir el biodiésel y en la tabla 2 el grado de pureza requerido para salir al mercado.

Dos normas técnicas han sido aceptadas en el mundo para el biodiésel: la estadounidense (ASTM D6751

de 2003), que habla de los FAMAe (ácidos grasos de monoésteres, es decir, da entrada a los etil ésteres y a los metil ésteres) y la europea (No. 14214), la cual solo da entrada a los metil ésteres y deja de lado el etanol.

Las normas presentan propiedades como densidad y viscosidad, entre otras, que tiene que cumplir el producto y están entre rangos mínimos y máximos. Si un fabricante colombiano de biodiésel quiere entrar con su producto a Estados Unidos, deberá cumplir con la norma ASTM 6751 de 2003 que exige estos límites.

Hay una diferencia importante frente a un combustible convencional en el punto de inflamación: mientras que para un diésel convencional ese límite está por debajo de los 60°C, para un biodiésel está

Tabla 1. Normas técnicas del biodiesel. Propiedades físicoquímicas

Propiedad	Estándar aplicado a	EEUU Famae	Europa Fame	M/Prima	Proceso
Densidad @ 15°C	g / cm ³	---	0,86-0,90	++	+
Viscosidad @ 40°C	mm ² / s	1,9 -6,0	3,5-5,0	+ / -	+ +
Destilación 95% (°C)	°C	360 max	---		
Punto de ignición (Flash point)	°C	130 min	>101	+ / -	+ +
POFF (CFPP)	°C	Reportar	0 /-10 /-20	+ +	+ -
Contenido en azufre	% masa	0,0015 ó 0,05	<0,001	+ +	+ -
Residuo carbonoso conrad. del 100% del combustible	% masa	<0,05		+ / -	+ +
del 10% residual de destilado			<0,3	+ / -	+ +
Cenizas (sulfato)	% masa	<0,02	<0,02	-	+ +
Agua	mg / kg	<0,05%	<500		
Contaminantes totales	mg / kg	---	<24	+ +	+ +
Corrosión al cobre 3h / 50°C		< No,3	1	+ / -	+
Número de cetano		>47	>51	+ +	-
Índice de neutralización	mg KOH / kg	<0,8	<0,5	-	+ +
		ASTM D6751-03	EN 14214		

Tabla 2. Normas técnicas. Análisis de composición

Propiedad	EEUU Estándar	Europa Astm d6751-03	En 14214	M / prima	Proceso
Metanol	% masa		<0,2	-	+ +
Contenido en éster	% masa		>96,5	+ / -	+ +
Monoglicéridos	% masa		<0,8	-	+ +
Diglicéridos	% masa		<0,2	-	+ +
Triglicéridos	% masa		<0,2	-	+ +
Glicerol libre	% masa	<0,02	<0,02	-	+ +
Glicerol total	% masa	<0,24	< 0,25	-	+ +
Índice de Iodo			<120	+ +	-
M Ester de ác. linoleico (C18:3)	% masa		£12		
Ácidos insaturados > 4 C=C	% masa		£1		
Fósforo	mg/kg	< 0,001	<10	+ +	-
Metales alcalinos gr. I (Na, K)	mg/kg		<5	-	+ +
Metales alcalinos gr. II (Ca, Mg)	mg/kg		<5	-	+ +
Estab. a la oxidación a 110°C	horas		6	+	+ / -



por el orden de los 130°C, debido a que tiene relativamente pocos compuestos en su molécula y sus compuestos son poco volátiles.

Hay una diferencia fundamental entre las normas europea y estadounidense, relacionada con las propiedades de flujo a baja temperatura del biodiésel. Un diésel de aceite de palma tendría entrada fácilmente en Estados Unidos, en tanto que la norma deja que el negocio se haga entre el usuario y el fabricante del biodiésel (reparar); en cambio, si el aceite de palma quisiera entrar como biodiésel a Europa, tendría que estar limitado a los siguientes valores: 0°C del punto de obstrucción del filtro en frío, que es un punto intermedio entre el punto de nube y el punto de congelamiento del combustible; 0°C para el verano y entre -10 y -20 °C para el invierno, dependiendo de si se usara en un país mediterráneo o en uno del norte de Europa.

También hay otra propiedad importante que no tiene nada que ver con el proceso de fabricación, sino que depende de la materia prima de donde se obtenga el biodiésel: el número de cetano. La norma estadounidense es menos exigente, pues fija un valor mínimo de 47 (número de cetano), mientras que la europea lo fija en 51. El aceite de palma tiene un número de cetano superior a 55 y esta es una propiedad relacionada directamente con la calidad de la combustión del biodiésel. Su desventaja estaría en las propiedades de flujo en frío, que no dependen de la calidad del proceso o de la tecnología usada en la fabricación del biodiésel, sino de la naturaleza química de la palma (grado de saturación).

En las dos columnas de la derecha de ambas tablas se muestra la forma como afecta a las diferentes propiedades, la materia prima o el proceso de fabricación (NREL, 2004).

Desde el punto de vista de impurezas, la norma estadounidense es menos exigente que la europea. Por ejemplo, en contenido de ésteres Europa exige una conversión mayor de 96,5% del ácido graso a metiléster; mientras que la norma estadounidense limita sólo la glicerina y el nivel de fósforo. Esto tiene una implicación importante desde el

punto de vista de los laboratorios que haya en el país para garantizar la calidad de este producto.

Cabe aquí entonces preguntarse cómo se va a regular en Colombia o cómo se está regulando en el mundo la calidad del biodiésel? La directiva europea, en vista de las dificultades que se presentaron por la limitación de laboratorios, obligó a cada país a tener su propio laboratorio certificado para garantizar la calidad de la producción de biodiésel, al cual debe enviar una muestra para su verificación de cumplimiento de norma, toda entidad que desee sacar al mercado el producto. Es posible que esta situación haya inducido a los fabricantes de motores y vehículos, quienes están imponiendo unas garantías en su producto, a límites del 5% en la mezcla de biodiésel (World wide fuel charter, 2002). En Colombia, por el momento, el único laboratorio disponible para hacer estas pruebas está en Cenipalma. El Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) puede hacer algunas de ellas, pero más enfocadas a la petroquímica.

MATERIAS PRIMAS PARA EL BIODIÉSEL

En la Figura 1 se muestra en las ordenadas el porcentaje del contenido de ácidos grasos. La parte inferior corresponde a los saturados, la del centro de los monoinsaturados y la superior a los poliinsaturados (NREL, 2004).

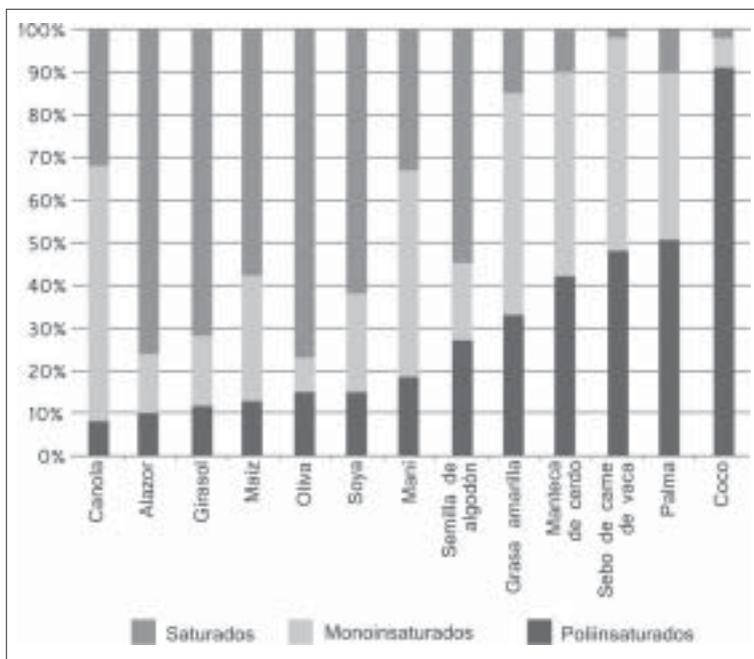


Figura 1. Concentración porcentual de ácidos grasos para diferentes aceites (NREL, 2004).

El aceite de palma es más o menos mitad saturado y mitad insaturado. Se destaca la canola, que es bastante atractiva para hacer biodiésel, en tanto que el mayor contenido de ácidos grasos está en la cadena de los monoinsaturados.

El hecho de que la materia prima sea monoinsaturada o poliinsaturada afecta propiedades determinantes que van a ejercer una función de cara al funcionamiento del motor (Tabla 3). Por ejemplo, los aceites saturados como el de palma, la manteca de cerdo, el sebo de vaca o el coco tienen muy buenas propiedades de combustión, un número de cetano alto -lo que significa que autoinflaman fácilmente en condiciones de cámara de combustión-; una estabilidad a la oxidación elevada -excelente para el almacenamiento por largos períodos- y una tendencia a la reducción de emisiones de óxido de nitrógeno. Pero la materia prima de palma de aceite tiene un defecto importante, especialmente inconveniente en bajas temperaturas: el punto de nube o punto de fluidez (Agudelo y Benjumea, 2004; Agudelo, 2004; Agudelo y Agudelo, 2006).

Los poliinsaturados tienen propiedades totalmente opuestas y en esta categoría caben el girasol, la colza y la oliva, que tienen dobles enlaces de carbono. El de canola, que es el aceite que más se produce en Canadá, tiene la ventaja de que está en un punto intermedio. La idea que tiene la petroquímica es la de implantar una estrategia de producción de biodiésel que explote las mejores características de cada materia prima y mezclarlas para obtener un producto que responda a las características exigidas por la normativa.

Cuando se incrementa el porcentaje de biodiésel en la mezcla con diésel, se aumenta la viscosidad del combustible, su densidad, su número del cetano y su tendencia a la oxidación, al tiempo que disminuye la volatilidad, el poder calorífico y las propiedades de

flujo en frío. Lo cual en unos casos es bueno (como en el número de cetano y la mayor densidad), y en otros no tanto, como en la mayor viscosidad y la menor volatilidad, pues estas dificultan el inicio del proceso de combustión.

Hay una propiedad que no hay que dejar de lado, y que se está convirtiendo en el motor para la industria del biodiésel en Europa y Estados Unidos, y es que, en porcentajes pequeños como aditivo, el biodiésel mejora sustancialmente las propiedades de lubricidad del combustible.

Los fabricantes de motores, vehículos y sistemas de inyección diésel en el mundo sugieren que no se usen proporciones mayores de 5% (sin embargo, en Estados Unidos hay flotas que utilizan el 20% y en Europa el 30%). Argumentan que el problema del biodiésel de cara a los sistemas de inyección es que tiene malas propiedades de flujo en frío, es higroscópico, y por tanto tiende a formar peróxidos, ácidos de grandes cadenas moleculares, que terminan facilitando la corrosión del sistema de inyección y la formación de depósitos y adicionalmente es incompatible con ciertos materiales (World wide fuel charter, 2002).

EXPERIMENTACIÓN

En el proyecto objeto de esta conferencia se probó un combustible diésel, llamado en Estados Unidos Diésel No. 2, con 350 ppm de azufre, que era el comercial en España en ese momento (ahora es de 50 ppm). Se probaron seis tipos distintos de biodiésel: uno procedente de aceite sin usar (aceite virgen) y otros de aceites de fritura usados. Los aceites vírgenes fueron: girasol (B1), que es común en España, colza (B2), común en centro de Europa y una mezcla de girasol y colza (B3) 70/30 de tal manera que cumpliera con la limitación de índice de yodo que exige la norma EN 14214. En cuanto a los aceites de fritura usados, se usaron dos, uno de alto estrés térmico, procedentes del sector hotelero y doméstico, y otro de bajo estrés térmico, procedente del sector hospitalario, que tenía una mezcla de oliva y girasol y 20% de palma.

Tabla 3. Efecto de la composición del biodiésel sobre algunas propiedades de combustión

Características	Saturados	Mono Saturados	Poli Saturados
Ácido graso	12:0, 14:0, 16:0, 18:0, 20:0	16:1 18:1, 22,0	18:2, 18:3 20:1, 22:1
Número de cetanos	Alto	Medio	Bajo
Nube de puntos	Alto	Medio	Bajo
Estabilidad	Alto	Medio	Bajo
Emisiones de nox	Reducción	Aumento leve	Aumento grande



En la Figura 2 se aprecia el porcentaje de biodiésel en la mezcla, el biodiésel puro y el diésel. Se observa que la disminución del poder calorífico es lineal con el incremento de biodiésel en la mezcla. El biodiésel puro tiene alrededor de 14% menos de poder calorífico másico que el diésel puro; es decir, 43 MJ/kg del diésel frente a 37 MJ/kg de biodiésel, y esto no depende de que el biodiésel fuera fabricado a partir de aceite de fritura usado o de aceite virgen.

El sistema de inyección del motor es volumétrico y, como el biodiésel tiene mayor densidad que el diésel, compensa en parte este menor poder calorífico, de

manera que en términos reales la diferencia energética entre el diésel y el biodiésel puro es del orden de 8%. Eso significa que a igualdad de potencia el motor consumiría algo así como 8%; si se usa biodiésel puro, o en otras palabras, a igualdad de combustible inyectado, el motor experimentaría una pérdida de potencia de cerca de 8%; si se usara biodiésel puro.

En la Figura 3 se muestra la instalación experimental, ubicada en el laboratorio de máquinas térmicas del grupo de combustibles y motores (GCM) de la Universidad de Castilla La Mancha. Consta de un motor diésel de inyección directa de 2,2 litros, 4

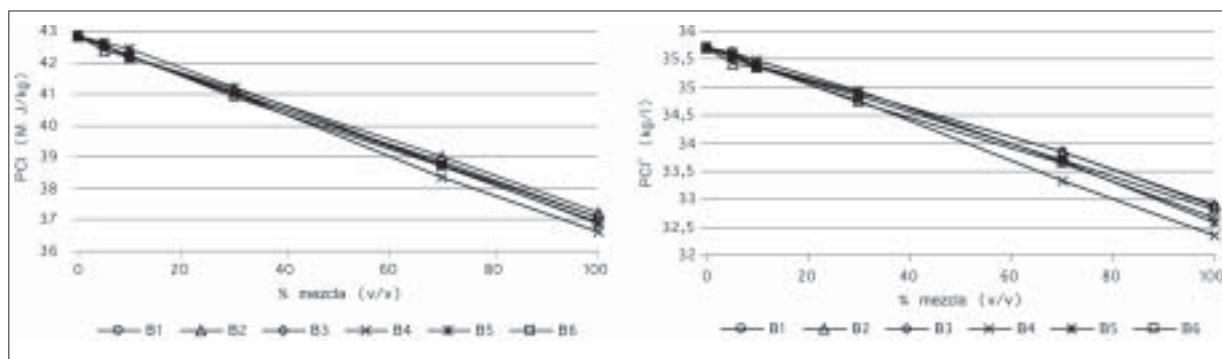


Figura 2. Poder calorífico de los combustibles ensayados.

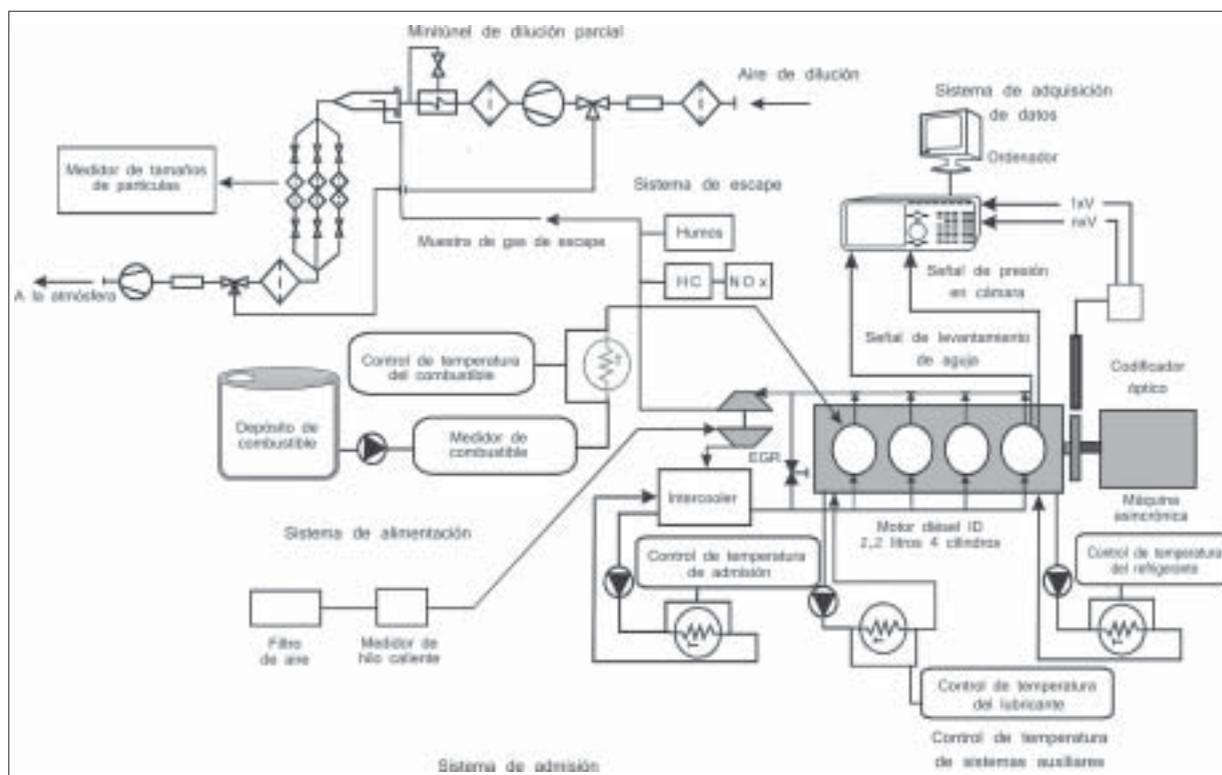


Figura 3. Instalación experimental.

cilindros en línea, turboalimentado y posenfriado, unido a un freno dinamométrico asíncrono que permite simular transitorios.

METODOLOGÍA PARA ENSAYOS EN MOTOR

El combustible de comparación es el diésel de referencia. En la Figura 4 se presentan los resultados con aceite de girasol al 30%, 70% y puro; también hay ensayos con aceite de fritura usado con alto estrés térmico y con biodiésel de aceite de fritura usado de bajo estrés térmico.

Los ensayos se hicieron primero con el combustible de referencia tomando cuatro mediciones en el mismo punto, se grafica la media aritmética y el intervalo del 95% de confianza estadística. Luego se limpiaban todos los conductos cada vez que se iba a hacer cambio de combustible. La metodología empleada consistió en mantener igualdad de condiciones de carga en el motor, es decir, condiciones de par y régimen de giro, tasa de recirculación de gases de escape constante, para no tener ruido de funcionamiento del motor y poder distinguir el efecto por el combustible (Figura 4).

En la Figura 5 se muestra que el dosado relativo (relación combustible/aire relativa a la estequiométrica) no se vio afectado significativamente con el uso de biodiésel, lo que permitió que las conclusiones que se obtuvieron de este trabajo fueran independientes de esta propiedad, y por tanto debidas únicamente al tipo de combustible usado.

En la Figura 6 se muestra el rendimiento efectivo, o relación entre cantidad de energía que se suministra

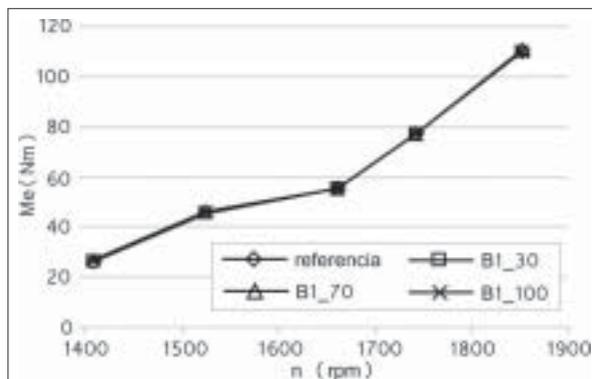


Figura 4. Metodología de ensayos. Igualdad de par motor. Resultados de girasol.

al motor respecto de la cantidad de energía que se convierte en trabajo útil en el eje, y como se aprecia, no varía con el tipo de combustible usado.

El consumo específico de combustible (g_{ef}) se incrementó independientemente de la procedencia del biodiésel, debido a que el biodiésel tiene menos poder calorífico. El aumento fue proporcional con el porcentaje de biodiésel en la mezcla, hasta alcanzar la máxima diferencia, en torno a 8,5% (Figura 7).

Bajo condiciones de régimen estacionario la opacidad del humo (Figura 8) disminuyó notablemente, pasando de 13- 14% con diésel a menos de 5% con biodiésel, independientemente del tipo de su procedencia. Además disminuye en proporción casi directa pero no lineal con su concentración en la mezcla. Este comportamiento se debe a que el biodiésel puro aporta más o menos 11% de masa de oxígeno molecular, adicionalmente carece de aromáticos y

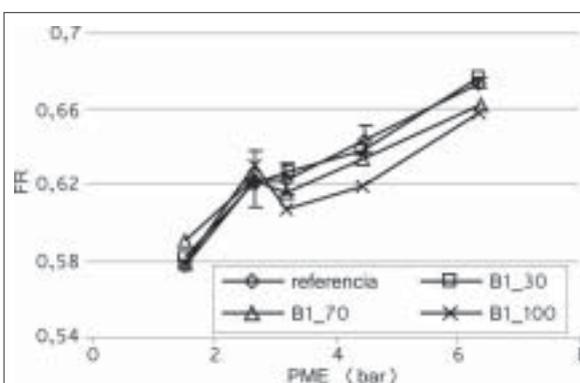


Figura 5. Relación Combustible/Aire relativa a la estequiométrica (Fr).

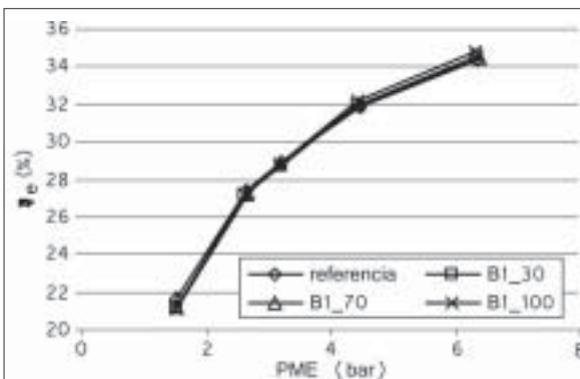


Figura 6. Rendimiento efectivo (h_e) en función del grado de carga (pme).

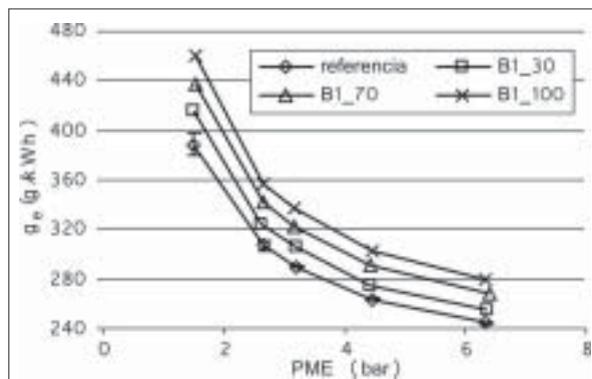


Figura 7. Consumo específico de combustible (g_e).

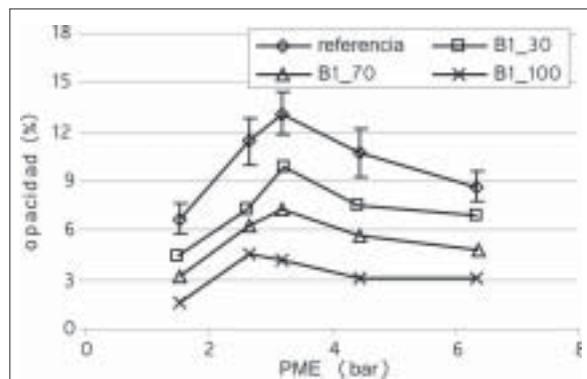


Figura 8. Opacidad del humo.

de azufre. También ayuda el hecho de que se produce un adelanto en el proceso de combustión y a un menor punto final en la curva de destilación respecto al diésel convencional (Lapuerta, *et al.*, 2007).

En la Figura 9 se muestra el material particulado, incluye además de la parte visible (opacidad del humo, normalmente inorgánica) todos los compuestos orgánicos, que son cerca del 50% del material particulado (PM). El PM disminuye al usar biodiésel por las mismas razones expuestas en el párrafo anterior (Lapuerta, *et al.*, 2007).

El tamaño de las partículas puede tener efectos nocivos sobre la salud, ya que entre más pequeñas más fácil llegan al alvéolo pulmonar; podría inclusive ser letal en caso de que el combustible tenga compuestos de carácter mutagénico o cancerígeno como los aromáticos y en general los poliaromáticos. En la Figura 10 se muestra la distribución del tamaño de partículas medido con un SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*). Se muestra la moda y la distribución estadística de los tamaños de partículas.

En misma figura se aprecia que para el combustible diésel la moda se ubica en torno a los 150 nm, mientras que para el biodiésel puro está al rededor de 90 nm. Si bien es cierto que disminuye el tamaño medio de la partícula con biodiésel, se puede observar que esas partículas no son más pequeñas que las del diésel, hay menor concentración de partículas y menor diámetro medio, pero no es debido a una mayor emisión de partículas pequeñas.

En la Figura 11 se muestran fotografías tomadas con un microscopio electrónico de barrido (SEM) a los filtros del minitúnel. A medida que incrementa la concentración de biodiésel se observa el filtro más limpio de material particulado. La esquina superior izquierda es el filtro con diésel, a la derecha está con B30 (30% de biodiésel + 70% diésel), abajo izquierda B70 y la esquina inferior derecha es B100.

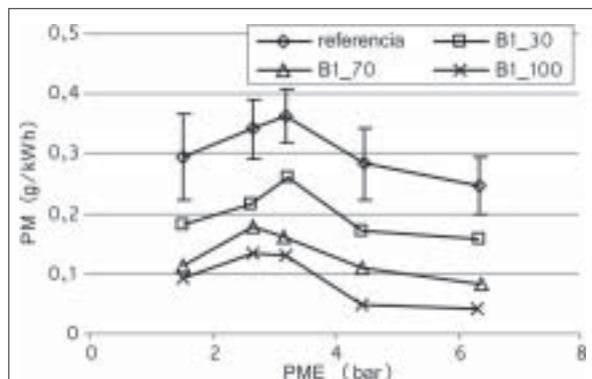


Figura 9. Material particulado (PM).

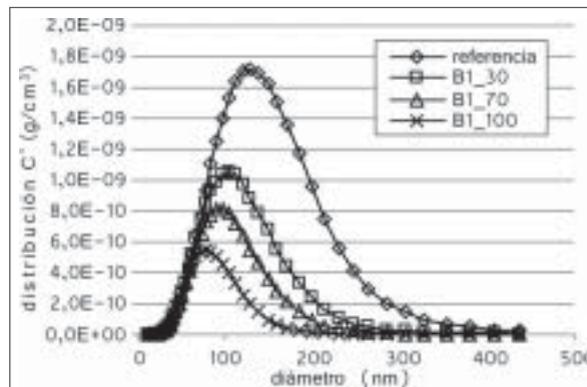


Figura 10. Distribución de tamaño de partículas.

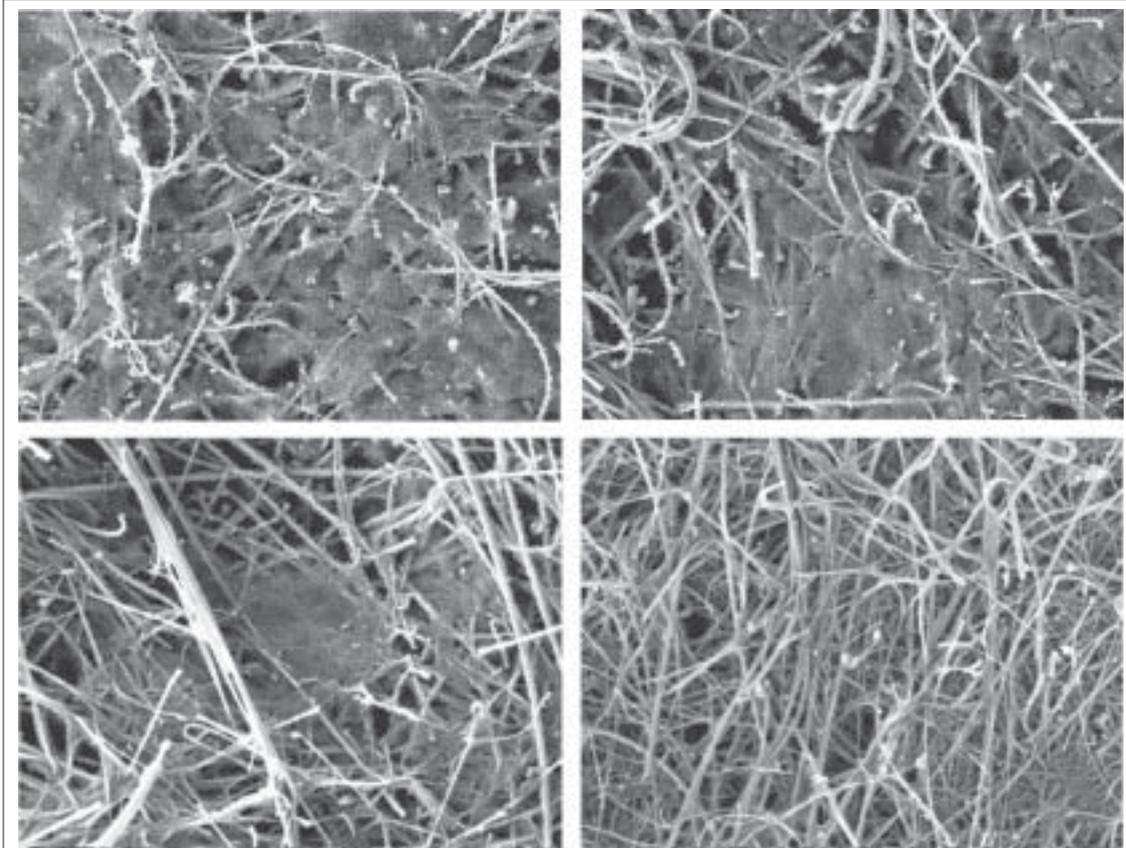


Figura 11. Imágenes de los filtros (fotografía de SEM).

COMBUSTIÓN

El análisis de combustión mostró que al usar biodiésel, la presión máxima de combustión se incrementaba ligeramente y por lo tanto como consecuencia de esto la temperatura media máxima en la cámara (Figura 12). La temperatura instantánea está en torno de los 1.700 K, y es ligeramente mayor al usar biodiésel. Este argumento permite a varios investigadores

explicar el hecho de que los óxidos de nitrógeno (NOx) sean mayores al usar biodiésel (Grabosky y McCormick, 1998; Hill y Douglas Smoot, 2000; Bragosky, *et al.*, 2003; Tat, 2003).

EXPERIENCIAS CON ACEITE DE PALMA

En las Figuras 13 y 14 se muestran algunos resultados de combustión con biodiésel de aceite de palma

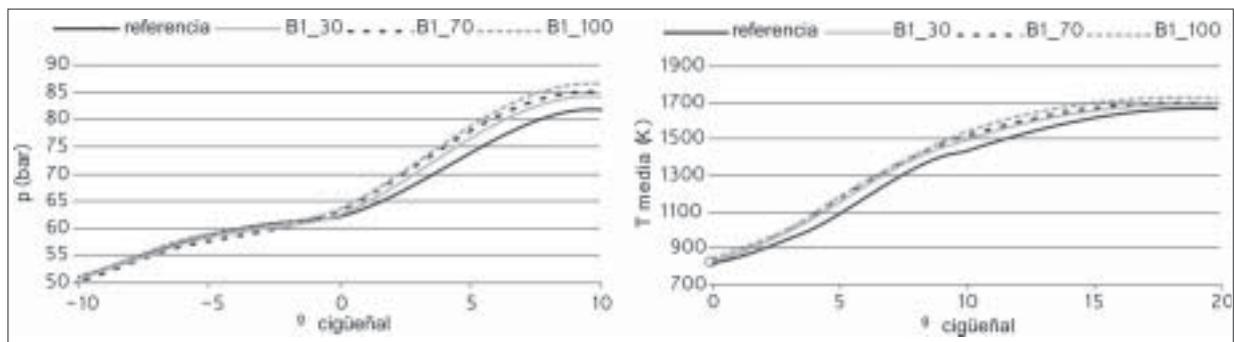


Figura 12. Presión y temperatura instantáneas en el cilindro.



crudo. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad de Antioquia. Obsérvese, en la Figura 13 las curvas de presión instantánea en el sistema de inyección y la tasa de liberación de energía. Se usó diésel comprado en una estación de servicio de la ciudad de Medellín y sus mezclas con biodiésel de aceite de palma al 5% (B5) y al 20% (B20). El motor de ensayos es un Isuzu de 2,5 litros, cuatro cilindros en línea, turboalimentado de inyección directa, provisto de bomba de inyección mecánica del tipo rotativa. Se observa un adelanto en la inyección y además se observa un adelanto en el proceso de combustión y eso tiene su efecto sobre la presión máxima y la temperatura media máxima dentro de la cámara de combustión (Figura 14).

CONCLUSIONES

- Para la industria del biodiésel, que está naciendo en Colombia, es determinante garantizar la calidad del producto final. Cada fabricante de tecnología debe garantizarla, independientemente de la materia prima que se utilice.
- Las propiedades físico-químicas del biodiésel son independientes de la materia prima de la que se produzca. El biodiésel tiene: mayor densidad, viscosidad y número de cetano. Igualmente tiene menor poder calorífico, volatilidad y temperatura adiabática de llama.
- Los ensayos realizados, a igualdad de prestaciones

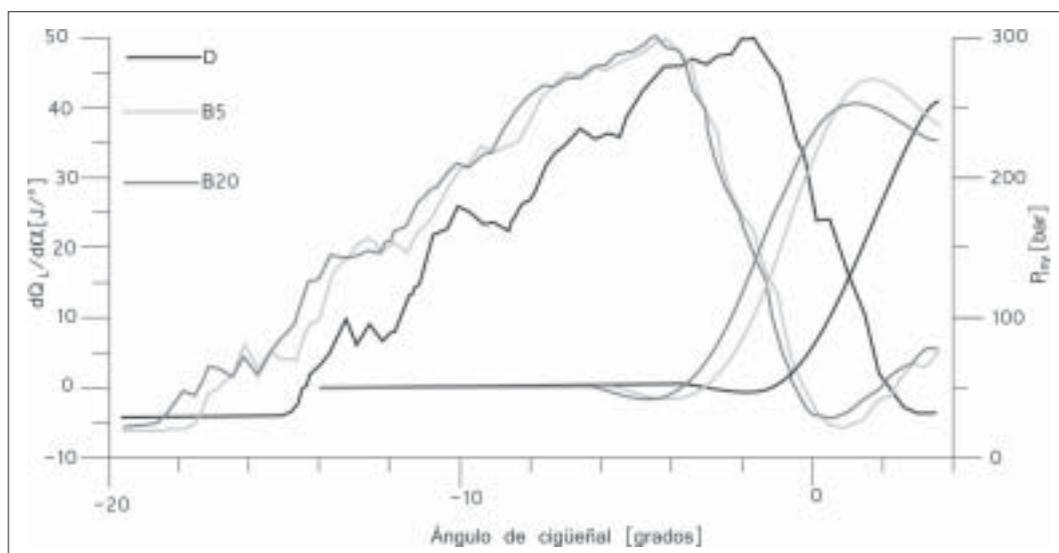


Figura 13. Presión en la inyección y tasa de liberación de calor instantáneas en el cilindro con biodiésel de aceite de palma.

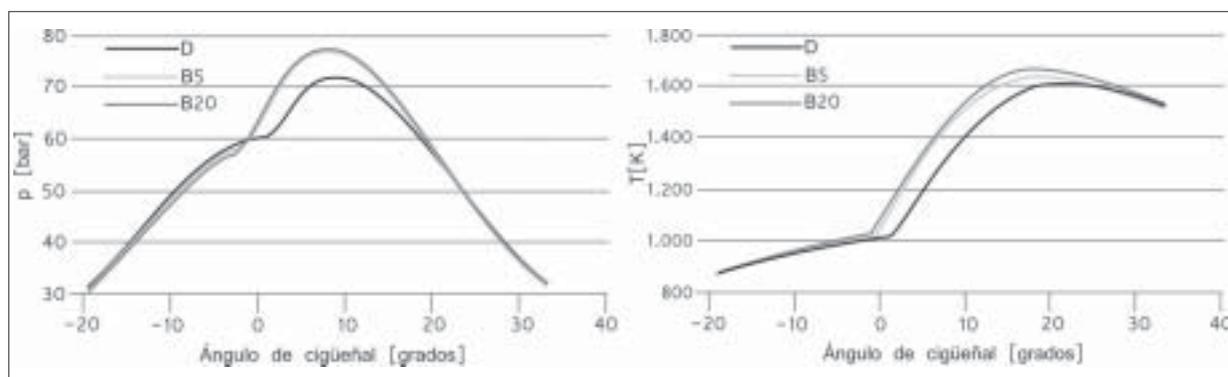


Figura 14. Presión y temperatura instantáneas en el cilindro con biodiésel de aceite de palma.

implicaron: igual rendimiento efectivo, mayor consumo de combustible, menor emisión de hollín/partículas, menor diámetro medio de partículas, pero no más partículas pequeñas, y adelanto de la combustión.

- El sistema de inyección del motor es volumétrico y, como el biodiésel tiene mayor densidad que el diésel, compensa en parte este menor poder calorífico, de manera que en términos reales la diferencia energética entre el diésel y el biodiésel puro es del orden de 8%.

RETOS

En el corto plazo:

- Incrementar de las proporciones del biodiésel: pasar de B5 a B20 y luego a B30 en flotas cautivas. Ello dependerá de la garantía de suministro de materia prima, el desarrollo de tecnologías de producción y la reducción de costos, además de la conciencia

de fabricantes de motores y sistemas de inyección, y la mejora en el proceso de purificación.

- Desarrollar la industria oleoquímica asociada a la producción de biodiésel y garantizarle utilización ambientalmente segura y sostenible a la glicerina obtenida del proceso de fabricación del biodiésel.

Mediano – largo plazo:

- Utilizar de nuevas materias primas, con especial énfasis en las que no compiten con el sector alimentario, como por ejemplo las obtenidas de la modificación genética de cultivos, materias primas nativas e introducidas y las grasas animales.

AGRADECIMIENTOS

A la Junta de Comunidades de Castilla – La Mancha por financiar el proyecto COMBALT, a Cidaut, Stock del Vallés, Repsol e Interquim S.A. por suministrar los combustibles y a COLCIENCIAS por financiar el proyecto 1115-05-16882

REFERENCIAS

- NREL. Biodiesel, handling and use guidelines. 2004. www.doe.nrel.gov
- World wide fuel charter 2002. www.wwfcharter2002.com
- Agudelo, JR; Benjumea, P. 2004. *Biodiesel de aceite crudo de palma colombiano: aspectos de su obtención y utilización*. Imprenta Universidad de Antioquia, Medellín.
- Agudelo, AF. 2004. Diagnóstico termodinámico de motores diesel de inyección directa funcionando con ésteres metílicos de aceites vegetales. Trabajo de grado. Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Agudelo, JR; Agudelo, AF; Cuadrado, IG. 2006. Análisis de primera y segunda ley de un motor operando con biodiesel de aceite de palma. Parte II: balance exergético global. *Revista Energética* N.º 35, Medellín.
- Lapuerta, M; Rodríguez, J; Agudelo, JR. 2007. Diesel particulate emissions from used cooking oil biodiesel. *Bioresource Technology*. doi:10.1016/j.biortech. 2007.01.033
- Graboski, MS; McCormick, RL. 1998. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. *Prog. Energy Com. Sci.* 24: 125-164. 1998.
- Hill, SC; Douglas Smoot, L. 2000. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems. *Prog. Energy Com. Sci.* 26: 417-458.
- Grabosky, MS; McCormick, RL; Alleman, TL; Herring, AM. 2003. The effect of biodiesel composition on engine emissions from a DDC Series 60 diesel engine. Final Report. NREL.
- Tat, EM. 2003. *Investigation of oxides of nitrogen emissions from biodiesel – fuelled engines*. Doctoral Thesis. Iowa State University.

