

Propiedades de flujo a baja temperatura del biodiesel de aceite de palma

Cold flow properties of palm oil biodiesel

Pedro Nel Benjumea^{a,}, John Ramiro Agudelo^b, Luis Alberto Ríos^c*

^aGrupo Combustibles Alternativos. Instituto de Energía. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Calle 59A N.º 63-20, Medellín, Colombia.

^bGrupo Gimel. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, A. A. 1226, Medellín, Colombia.

^cGrupo Procesos Físicoquímicos Aplicados, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. A. A. 1226. Medellín, Colombia.

(Recibido el 08 de mayo de 2007. Aceptado el 10 de agosto de 2007)

Resumen

El deficiente desempeño del biodiesel de aceite de palma (BAP) a bajas temperaturas constituye su mayor deficiencia de calidad y el limitante para propiciar el uso de este combustible alternativo para motores diesel puro o mezclado en altas proporciones con el combustible diesel convencional derivado del petróleo (ACPM). En este trabajo se evalúan varias alternativas para mejorar las propiedades de flujo a baja temperatura (PFBT) del BAP. Mediante la producción del biodiesel utilizando alcoholes ramificados como el isopropanol, isobutanol, 2-butanol e isopentanol se obtienen alquilésteres del aceite de palma con puntos de nube y fluidez más bajos que los correspondientes a los metilésteres. La sustitución del grupo metil por el isopentil permite obtener reducciones en los puntos de nube y fluidez de 8 y 21 °C, respectivamente. Los isopropilésteres del aceite de palma poseen un punto de nube 10 °C menor que el de los metilésteres. El punto de nube de las mezclas BAP-ACPM se incrementa en forma lineal con el contenido del biodiesel en la mezcla. Para las mezclas probadas (B5, B20 y B30) solo se presentan problemas de filtrabilidad del combustible a temperaturas por debajo de -4 °C. En este trabajo se evaluó la efectividad de dos aditivos comerciales mejoradores de flujo para reducir el punto de obstrucción de filtros en frío (POFF) del biodiesel puro y las mezclas probadas. Los resultados obtenidos mostraron que con dichos aditivos

* Autor de correspondencia: teléfono: 57+4+411 91 67, fax: 57+4+234 10 02, correo electrónico: pbenjume@unalmed.edu.co (P. Benjumea).

solamente es posible obtener reducciones en el POFF de la mezcla B5 cuando se usa la menor de las tres concentraciones de aditivo probadas.

----- *Palabras clave:* biodiesel de aceite de palma, alcoholes ramificados, punto de nube, punto de fluidez, punto de obstrucción de filtros en frío.

Abstract

The faulty performance of palm oil biodiesel at low temperatures constitutes its main quality drawback and limitation to use this alternative fuel for diesel engines either as a neat fuel or blended with conventional diesel fuel derived from petroleum. In this work, several alternatives for improving the cold flow properties of palm oil biodiesel are evaluated. The production of biodiesel using branched-chain alcohols such as isopropyl alcohol, isobutyl alcohol, 2-butyl alcohol and isopentyl alcohol allows the production of palm oil alkyl esters having cloud and pour points lower than those of methyl esters. Substituting isopropyl for the methyl group allows reductions in the cloud and pour points of 8 and 21 °C, respectively. Palm oil isopropyl esters have a cloud point 10 °C lower than the corresponding methyl esters. The cloud point of the palm oil biodiesel-diesel fuel blends linearly increases with mixture biodiesel content. In the case of the tested blends there may be fuel filterability problems only at temperatures below -4 °C. This work also presents the effectiveness of two commercial additives used to reduce the cold filter plugging point of neat biodiesel and the tested blends. The results obtained showed that by using such additives it is only possible to obtain reductions in the B5 blend cold filter plugging point when the lowest additive concentration was used.

----- *Key words:* palm oil biodiesel, branched chain alcohols, cloud point, pour point, cold filter plugging point.

Introducción

El biodiesel (mezcla de alquilésteres de ácidos grasos de cadena larga saturados e insaturados) es actualmente el combustible alternativo más ampliamente aceptado para sustituir parcial o totalmente al combustible diesel convencional derivado del petróleo (mezcla de hidrocarburos parafínicos, nafténicos y aromáticos). A pesar de las diferencias en su naturaleza química y en su contenido de carbono (el biodiesel posee un contenido másico de carbono alrededor de un 11% menor que el del diesel), ambos combustibles están constituidos por moléculas con un número similar de átomos de carbono en su estructura, normalmente en el rango de 9 a 23, siendo las más representativas aquellas que poseen entre 16 y 18 [1, 2, 3]. De acuerdo con su peso molecular, varias de las mencionadas moléculas presentes en el diesel y en el biodiesel serían sólidas a condiciones estándar (1 atmósfera y 15 °C) si se encontrasen aisladas como sustancias puras.

Un combustible para motores diesel además de cumplir con las especificaciones que comúnmente aparecen estipuladas en los estándares de calidad como: viscosidad, volatilidad, número de cetano, contenido de azufre, etc., debe tener un desempeño adecuado a bajas temperaturas. A medida que la temperatura ambiente disminuye, las moléculas más saturadas del combustible pueden empezar a formar cristales, los cuales inicialmente son de tamaño muy fino, prácticamente invisibles al ojo humano. Si la temperatura continúa disminuyendo, tales cristales van creciendo hasta hacerse visibles y pueden llegar a formar aglomerados de un tamaño suficiente para restringir o taponar el flujo a través de los conductos y filtros por los que se conduce el combustible desde el tanque de almacenamiento hasta el sistema de inyección. Como consecuencia de dicho taponamiento, al momento del arranque, el combustible no alcanza a llegar a los inyectores y a la cámara de combustión y por lo tanto el motor no enciende.

La tendencia de los combustibles diesel a formar cristales y perder su capacidad de flujo se suele

cuantificar mediante una serie de parámetros experimentales, los cuales se conocen comúnmente en la industria de los combustibles como propiedades de flujo a baja temperatura (PFBT). Entre tales parámetros se tienen: el punto de nube (*cloud point*), el punto de fluidez o de vertido (*pour point*), el punto de obstrucción de filtros en frío (*cold filter plugging point*) y la prueba de flujo a baja temperatura (*low temperatura flow test*).

Desde los inicios de la industria del biodiesel en los años ochenta, las asociaciones mundiales de productores de vehículos y motores han manifestado su preocupación por las deficientes PFBT de los diferentes tipos de biodiesel que han logrado nivel comercial. Aun los tipos de biodiesel más insaturados (metilésteres de los aceites de colza, soya y girasol) presentan un desempeño a bajas temperaturas muy inferior al del combustible diesel convencional [4]. Dado su alto contenido de alquilésteres saturados (alrededor del 50% por peso), las PFBT del biodiesel de aceite de palma son mucho más críticas que para los otros tipos de biodiesel comerciales, constituyéndose en su mayor deficiencia de calidad y limitante para propiciar su uso puro o mezclado en diferentes proporciones con el combustible diesel convencional derivado del petróleo.

La situación descrita en el párrafo anterior ha motivado la realización de investigaciones orientadas a mejorar el desempeño del biodiesel a bajas temperaturas. La mayoría de tales trabajos se han realizado en Norteamérica, donde se comercializa principalmente biodiesel de aceite de soya. Entre las estrategias identificadas para mejorar el desempeño del biodiesel a bajas temperaturas se tienen: i) mezclado en bajas proporciones con el combustible diesel convencional, ii) uso de aditivos formulados para mejorar las PFBT de combustibles tipo hidrocarburo o de nuevos aditivos desarrollados específicamente para alquilésteres de ácidos grasos [5, 6, 7, 8, 9], iii) la producción de los alquilésteres utilizando alcoholes ramificados o de mayor longitud de cadena que el metanol [10, 11] y iv) el fraccionamiento, ya sea del aceite

utilizado como materia prima o del biodiesel producido, mediante una cristalización inducida por enfriamiento y la posterior separación de las fases sólida y líquida formadas [12, 13].

En este artículo se presentan resultados experimentales del punto de nube, el punto de fluidez y el punto de obstrucción de filtros en frío para el biodiesel de aceite de palma (obtenido mediante metanólisis básica) y para varias de sus mezclas con el combustible diesel corriente o ACPM que se comercializa en Colombia. Adicionalmente se analiza la efectividad de la producción de alquilesteres de alcoholes ramificados y el uso de aditivos comerciales, como alternativas para mejorar las PFBT del biodiesel de aceite de palma.

Metodología

Obtención de los alquilesteres del aceite de palma

De acuerdo con su naturaleza química, el biodiesel se puede definir como una mezcla de monoalquilesteres de ácidos grasos de cadena larga. La forma más expedita de obtener tales alquilesteres es mediante la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales. En general, una reacción de transesterificación consiste en la transformación de un tipo de éster en otro. Cuando el éster original reacciona con un alcohol, la reacción de transesterificación se denomina alcoholisis. En el caso de la alcoholisis de un aceite vegetal, los triglicéridos presentes en el aceite se combinan con un alcohol alifático de bajo peso molecular en presencia de un catalizador. La mayor parte del biodiesel que actualmente se comercializa en el mundo se produce mediante metanólisis básica, o sea, utilizando metanol y un catalizador básico de bajo costo como el NaOH o el KOH.

Para este estudio se prepararon a partir del aceite crudo de palma, además de metilésteres, otros cuatro tipos de alquilesteres, utilizando los siguientes alcoholes ramificados: isopropanol, isobutanol, 2-butanol e isopentanol o isoamílico. Los metilésteres del aceite de palma fueron producidos mediante alcoholisis convencional utilizando

hidróxido de sodio como catalizador, de acuerdo con las cantidades de reactivos y condiciones de reacción propuestas por Benjumea, Agudelo y Cano [14]. Al intentar obtener los alquilesteres de los alcoholes ramificados por alcoholisis básica, en algunos casos se obtuvieron rendimientos de reacción muy bajos, mientras que en otros la reacción no procedió. Por tal motivo la producción de tales alquilesteres se hizo utilizando una ruta indirecta compuesta por las siguientes cinco etapas: esterificación previa del aceite crudo de palma, saponificación de los triglicéridos con KOH para la producción de jabones de potasio y glicerol, hidrólisis de los jabones formados, esterificación de los ácidos grasos liberados en la etapa anterior y una neutralización final con NaOH de los ácidos grasos que no alcanzaron a esterificarse. Mediante la ruta mencionada, implementada en el laboratorio del Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados de la Universidad de Antioquia, fue posible obtener alquilesteres con índices de acidez inferiores a 0,11%.

Medición de las propiedades de flujo a baja temperatura

Las propiedades de flujo a baja temperatura consideradas en este estudio fueron el punto de nube (PN), el punto de fluidez (PF) y el punto de obstrucción de filtros en frío (POFF). Dichas propiedades se determinaron en el Laboratorio de Crudos y Derivados de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, siguiendo los procedimientos descritos en los estándares ASTM D2500, D97 y D6371 [15, 16, 17], respectivamente.

El punto de nube se define como la temperatura a la cual se hacen visibles los cristales que se forman en el seno del líquido cuando una muestra de combustible se enfría gradualmente. El equipo básico utilizado en la prueba consta de un baño de enfriamiento, un recipiente de vidrio que contiene la muestra y termómetros adecuados. Por su parte, el punto de fluidez es la temperatura a la cual el crecimiento y posterior aglomeración de los cristales son tales que se impide el libre flujo del combustible cuando el recipiente que lo

contiene se coloca en un plano horizontal. Ambos parámetros tienen la desventaja de no simular lo que realmente le ocurre al combustible en el sistema de alimentación del motor. Mientras que el punto de nube da una idea conservativa de la temperatura a la cual se tendrían problemas en el arranque del motor, el punto de fluidez da una idea optimista.

El POFF constituye un método alternativo a los puntos de nube y fluidez que permite evaluar adecuadamente la filtrabilidad del combustible a bajas temperaturas. Dicho parámetro se define en el estándar ASTM D6371 como la temperatura más alta a la cual una cantidad dada de combustible (20 ml) al ser enfriada bajo condiciones controladas (una tasa de 40 °C por hora) no fluye por un tiempo dado (60 s) a través de un filtro prescrito (malla de 45 μ) bajo unas condiciones de succión definidas (1,96 kPa de vacío).

Caracterización complementaria de los alquilesteres del aceite de palma

La composición química del BAP (metilésteres del aceite de palma) se determinó mediante cromatografía gaseosa utilizando una columna AT-WAX de 60 m y un detector TCD. A los alquilesteres se les determinó, además de sus PFBT, sus propiedades más importantes como combustibles para motores diesel como: poder calorífico, viscosidad y volatilidad (curvas de destilación), de acuerdo con los estándares ASTM D240, D445 y D86 [18, 19, 20], respectivamente.

Preparación de las mezclas y dosificación de los aditivos

Se prepararon varias mezclas entre el biodiesel comercial de aceite de palma, BAP (metilésteres del aceite de palma) y un combustible diesel adquirido en una estación de servicio conocido comercialmente como diesel corriente o ACPM. Entre las mezclas seleccionadas se encuentran la B5 (5% BAP-95% ACPM) por ser la que inicialmente se utilizará en Colombia y la B20 que es la más comercializada en el mundo. El BAP y el ACPM puros se designan como B100 y B0,

respectivamente. A todas las mezclas, preparadas en base volumétrica a la temperatura ambiente del laboratorio donde se realizaron las pruebas (25 °C), se les determinaron el POFF y los puntos de nube y fluidez.

Para evaluar su efectividad como mejoradores de las PFBT del BAP y sus mezclas con ACPM se probaron dos aditivos comerciales denominados en este estudio como LB y FX, respectivamente. Como criterio de evaluación de la efectividad de los aditivos se seleccionó la reducción lograda en el POFF con respecto al valor de dicha propiedad para el combustible sin aditivar. Generalmente, el objetivo de los aditivos mejoradores de las PFBT no es impedir la aparición de los cristales (PN), sino evitar que crezcan y se aglomeren (PF y POFF). Se seleccionaron tres concentraciones volumétricas de aditivos (0,2, 0,75 y 1%), después de hacer varios preensayos y tener en cuenta las recomendaciones de su fabricante. El aditivo se agregó al B100 y a las mezclas B5, B20 y B30 mediante pipetas de precisión y posteriormente cada combustible aditivado fue homogeneizado mediante agitación.

Análisis de resultados

Inicialmente se discute el efecto que tiene el grupo alquílico aportado por los diferentes alcoholes ramificados utilizados en la obtención de los alquilesteres sobre las PFBT del biodiesel resultante. Además, se analizan las principales propiedades de los alquilesteres de cara a su utilización como combustibles diesel. Posteriormente, se analiza la variación de las PFBT con respecto al porcentaje de biodiesel en las mezclas BAP-ACPM. Finalmente, se valora la efectividad de los aditivos utilizados en la reducción del POFF del BAP y sus mezclas con ACPM.

Efecto del grupo alquílico

En una molécula de alquilester el grupo funcional se encuentra unido a dos cadenas hidrocarbonadas, R1-COO-R2. La cadena R2 correspondiente al ácido graso esterificado (R2-COOH) es la más larga y la que tiene mayor influencia en

las propiedades del biodiesel como densidad, viscosidad, poder calorífico, etc. Por su parte la cadena más corta R1 corresponde al grupo alquílico aportado por el alcohol utilizado en la obtención del biodiesel y se ha encontrado que afecta el patrón de cristalización de la molécula. En la tabla 1 se presenta la composición química del BAP (mezcla de metilésteres). Como puede verse los metilésteres mayoritarios son los del ácido palmítico (saturado) y los del ácido oleico (monoinsaturado).

Tabla 1 Composición química del biodiesel de aceite de palma

<i>Tipo de metiléster</i>	<i>Porcentaje másico</i>
Ácido laúrico	0,267
Ácido mirístico	1,434
Ácido palmítico	46,130
Ácido esteárico	3,684
Ácido oleico	37,470
Ácido linoleico	11,020
Alquilésteres saturados	51,515
Alquilésteres insaturados	48,485

Las diferentes mezclas de alquilésteres, independientemente del alcohol utilizado, deben tener una composición similar a la de los metilésteres, ya que todos ellos provienen del mismo aceite crudo de palma. En la figura 1 se puede observar una comparación pico a pico de los cromatogramas para los diferentes alquilésteres ramificados con respecto al estándar de los metilésteres. La no aparición de picos para mono, di o triglicéridos constata la pureza de los alquilésteres obtenidos.

En la tabla 2 se presentan los puntos de nube y fluidez, la viscosidad cinemática y el poder calorífico superior para los diferentes alquilésteres del aceite de palma probados en este trabajo. En la figura 2 se contrastan las curvas de destilación para dichos alquilésteres.

En lo referente a sus PFBT puede observarse que los diferentes alquilésteres de alcoholes ramificados poseen puntos de nube similares. El punto de nube más bajo corresponde a los isopropilésteres, con los cuales se logra una reducción de 10 °C con respecto al valor de dicha propiedad para los metilésteres. Los alquilésteres del alcohol ramificado de mayor peso molecular (isoamilésteres) poseen el menor punto de fluidez. Con la sustitución del grupo metil por el grupo isopentil se obtiene una reducción del punto de fluidez de 21 °C.

Una hipótesis para explicar físicamente el efecto del grupo alquílico en las PFBT de las mezclas de alquilésteres fue sugerida por Dunn [10]. Según este investigador, los alquilésteres tienden a formar láminas delgadas durante la aglomeración o nucleación de los cristales y la presencia de grupos alquílicos ramificados afecta el espaciamiento entre las moléculas individuales en las láminas causando un desorden rotacional en las cadenas hidrocarbonadas que se traduce en una formación y empaquetamiento de cristales iniciales menos estable que en el caso de los metilésteres.

Para que los alquilésteres de alcoholes ramificados sean viables técnicamente como combustibles diesel, además de exhibir un buen desempeño a bajas temperaturas, los valores de sus propiedades deben estar entre los rangos estipulados por los estándares de calidad pertinentes. De acuerdo con el estándar ASTM D6751 *Standard Specification for Biodiesel Fuel (B100) Blend Stock for Distillate Fuels*, la viscosidad cinemática del biodiesel debe estar en el rango entre 1,9 y 6,0 mm²/s y la temperatura correspondiente al 90% de destilado en la curva de destilación (T90) no debe sobrepasar los 360 °C [21]. Como puede observarse en la tabla 2 solo los 2-butilésteres sobrepasan ligeramente el valor límite para la viscosidad. En la figura 2 puede observarse que las curvas de destilación de los isoamilésteres e isobutilésteres están por encima de las de los demás alquilésteres en casi todo el rango de destilación. El valor de la T90 para estos dos alquilésteres sobrepasa el límite máximo de 360 °C, siendo 364,5 y 369,5 °C para los isobutilésteres y los amilésteres, respectivamen-

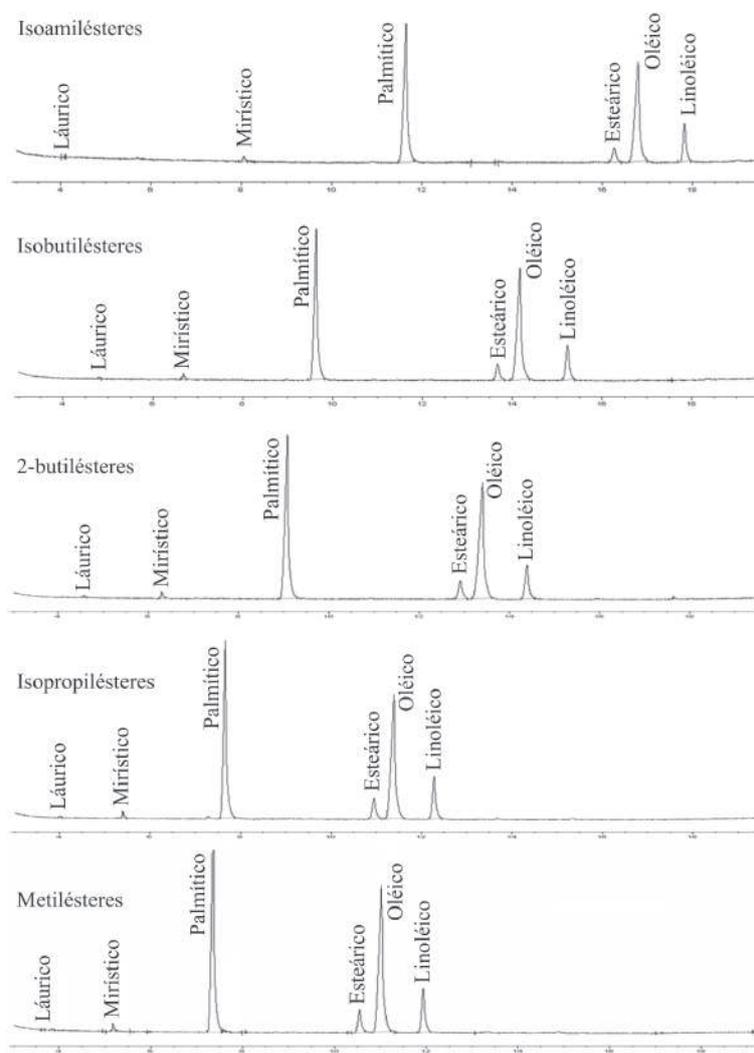


Figura 1 Comparación de los cromatogramas de los alquilésteres del aceite crudo de palma

Tabla 2 Principales propiedades de los alquilésteres del aceite de palma

<i>Tipo de alcohol</i>		<i>Tipo de Alquilésteres</i>	<i>Punto de Nube (°C)</i>	<i>Punto de Fluidez (°C)</i>	<i>Viscosidad cinemática mm²/s</i>	<i>Poder Calorífico Superior MJ/kg</i>
Metanol	CH ₄ O	Metilésteres	16	12	4,71	39,837
Isopropanol	C ₃ H ₈ O	Isopropilésteres	6	-3	5,02	40,602
Isobutanol	C ₄ H ₁₀ O	Isobutilésteres	7	-3	5,59	40,727
2-butanol	C ₄ H ₁₀ O	2-butilésteres	7	-6	6,19	40,620
Isopentanol	C ₅ H ₁₂ O	Isoamilésteres	8	-9	5,86	40,951

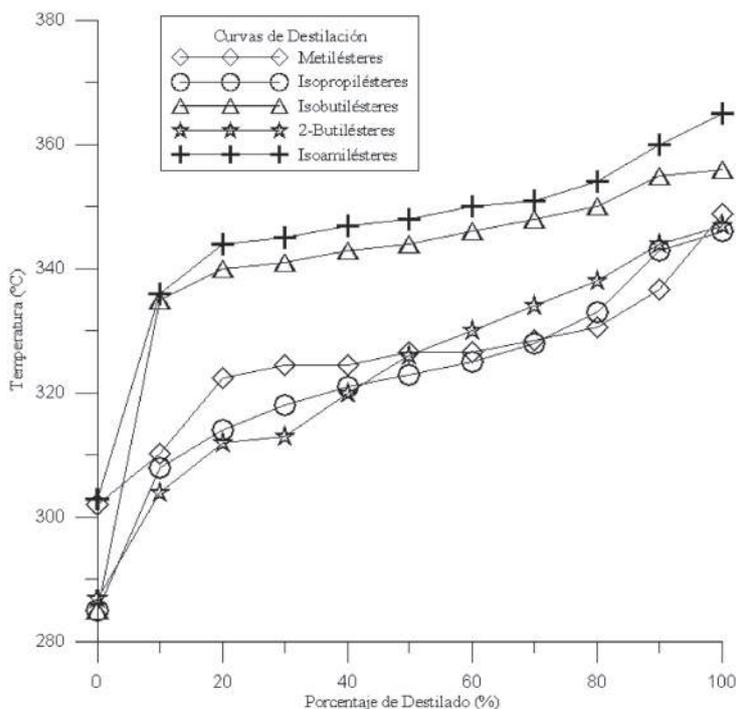


Figura 2 Curvas de destilación de alquilésteres del aceite de palma

te. De la tabla 1 también se puede observar que en correspondencia con su mayor contenido de átomos de carbono, los amilésteres poseen un mayor poder calorífico superior.

Aunque técnicamente se ha demostrado que es factible producir alquilésteres del aceite de palma con puntos de nube y fluidez considerablemente más bajos que los metilésteres, se hace necesario evaluar la factibilidad económica de esta alternativa de mejoramiento de las PFBT del BAP. Hay que tener en cuenta que los alcoholes ramificados son más costosos que el metanol y que además el proceso de obtención de los alquilésteres requiere de un número mayor de etapas o de condiciones de operación (presión, temperatura, agitación) más severas.

Efecto del porcentaje de biodiesel sobre las PFBT de las mezclas BAP-ACPM

En la tabla 3 se presentan los valores experimentales del PF y el POFF para el BAP y el ACPM puros y para las mezclas B5, B20 y B30. En el

caso del PN aparecen adicionalmente los valores correspondientes a las mezclas B10, B40 y B50.

Tabla 3 PFBT de mezclas BAP-ACPM

Combustible	PN (°C)	PF (°C)	POFF (°C)
B100	16	12	11
B50	5	-	-
B40	3	-	-
B30	1	-6	-4
B20	-1	-6	-5
B10	-2	-	-
B5	-3	-6	-5
B0	-3	-6	-5

El hecho de que varios de los valores reportados para las PFBT en la tabla 3 sean iguales, no implica que los valores medidos de dichas propiedades sean exactamente iguales. Lo que ocurre es que los métodos utilizados son ma-

nuales y contemplan que los valores medidos sean aproximados al entero más cercano (PN y POFF), o al múltiplo de tres más cercano (PF). En el caso particular del PF, el estándar ASTM D97 establece que el valor reportado debe resultar de sumar 3 °C a la temperatura múltiplo de tres a la cual no se observa movimiento del fluido cuando el recipiente que lo contiene es colocado en un plano horizontal.

De la tabla 3 puede inferirse que los valores del POFF tienden a estar comprendidos entre los del PN y el PF y que con el uso de mezclas hasta B30 solo se tendrían problemas operacionales en el sistema de suministro de combustible al motor a temperaturas inferiores a -4 °C. Para el rango de mezclas probadas puede afirmarse que sus PFBT son prácticamente determinadas

por la presencia del ACPM, lo cual indica que si se usa un combustible diesel con mejores PFBT, las mezclas resultantes tendrían consecuentemente más bajos PN, PF y POFF. En Colombia se producen varios tipos de combustible diesel convencional, los cuales se comercializan de acuerdo con las condiciones ambientales de las diferentes regiones del país.

En la figura 3 se muestra el efecto del porcentaje volumétrico de biodiesel (Y_{BAP}) sobre el PN de las diferentes mezclas BAP-ACPM. Los datos experimentales se ajustaron por medio una regresión lineal con un $R^2 = 0,9933$.

$$PN_M = 0,2001(Y_{BAP}) - 4,6048$$

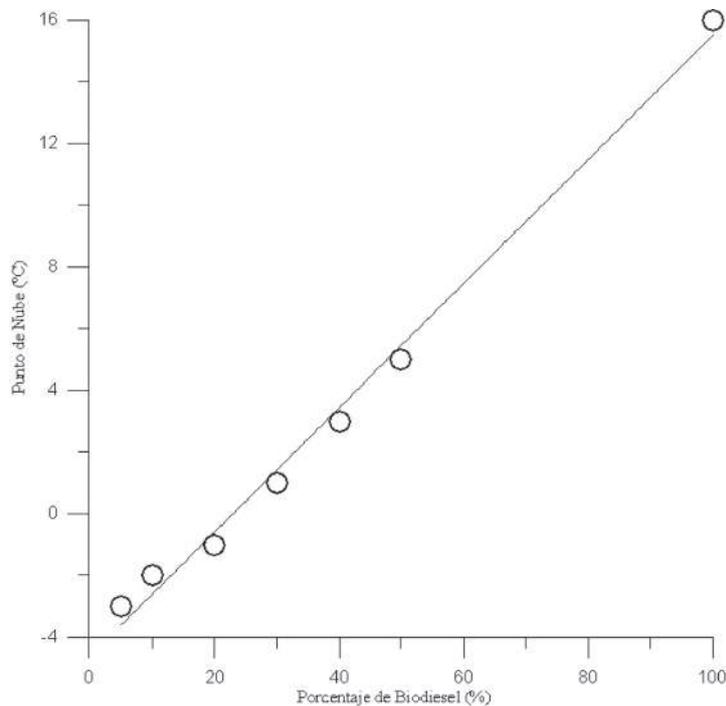


Figura 3 Efecto del porcentaje de biodiesel en el PN de las mezclas BAP-ACPM

Efecto de aditivos mejoradores de flujo a baja temperatura

En la tabla 4 se presentan los resultados del POFF para las diferentes mezclas BAP-ACPM

aditivadas. El valor entre corchetes corresponde a la reducción lograda en el POFF con respecto a los valores de esta propiedad reportados para cada mezcla en la tabla 3.

Como puede observarse en la tabla 4, los aditivos utilizados prácticamente no tienen ningún efecto sobre el POFF del BAP puro, ni sobre las mezclas con mayor contenido de biodiesel. En el caso del B5 se logran reducciones en el

POFF de 8 y 9 °C con los aditivos LB y FX, respectivamente. Tales reducciones corresponden a la concentración más baja de aditivo tenida en cuenta en la experimentación.

Tabla 4 Efecto de aditivos comerciales en el POFF de mezclas BAP-ACPM

Mezcla	Punto de obstrucción de filtros en frío, POFF (°C)					
	% LB			% FX		
	0,2	0,75	1,0	0,2	0,75	1,0
B5	-13 [8]	-6 [1]	-6 [1]	-14 [9]	-7 [2]	-6 [1]
B20	-10 [5]	-5 [0]	-5 [0]	-11 [6]	-7 [2]	-5 [0]
B30	-5 [1]	-4 [0]	-4 [0]	-5 [1]	-4 [0]	-4 [0]
B100	11 [0]	10 [1]	11 [0]	11 [0]	10 [1]	11 [0]

Los resultados obtenidos indican que los aditivos utilizados tienen la capacidad de mejorar el POFF de compuestos tipo hidrocarburo y no de tipo alquilesteres.

Conclusiones

- Mediante la producción del biodiesel utilizando alcoholes ramificados como el isopropanol, isobutanol, 2-butanol e isopentanol se obtienen alquilesteres del aceite de palma con puntos de nube y fluidez más bajos que los correspondientes a los metilesteres. La sustitución del grupo metil por el isopentil permite obtener reducciones en los puntos de nube y fluidez de 8 y 21 °C, respectivamente. Los isopropilésteres del aceite de palma poseen un punto de nube 10 °C menor que el de los metilesteres.
- En correspondencia con su mayor contenido de átomos de carbono, todos los alquilesteres de alcoholes ramificados poseen poderes caloríficos superiores a los metilesteres y sus valores son del orden de 40 MJ/kg. Únicamente los 2-butilésteres poseen una viscosidad cinemática mayor al límite máximo de 6

mm²/s fijado en el estándar ASTM D6751. Los isopentilésteres e isobutilésteres poseen una T90 mayor que la de los demás alquilesteres y su valor supera el límite máximo de 360 °C fijado en el estándar ASTM D6751.

- El punto de nube de las mezclas BAP-ACPM se incrementa en forma lineal con el contenido del biodiesel en la mezcla. Para las mezclas probadas (B5, B20 y B30) solo se presentan problemas de filtrabilidad del combustible a temperaturas por debajo de -4 °C.
- Con el uso de los dos aditivos comerciales probados en este estudio solo fue posible obtener reducciones en el POFF para la mezcla B5 al usar la menor de las tres concentraciones de aditivo seleccionadas. Los resultados indican que los aditivos probados en las proporciones utilizadas no son adecuados para combustibles tipo alquilesteres.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a Colciencias y al SENA por la financiación del proyecto 1118-06-17327.

Referencias

1. G. Knothe, J. Van Gerpen, J. Krahl. *The Biodiesel Handbook*. Champaign Illinois. AOCS Press. 2005. pp. 76-122.
2. C. Carraretto, A. Macor, A. Mirandola, A. Stoppato, S. Tonon. "Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations". *Energy*. Vol. 29. 2004. pp. 2195-2211.
3. M. Grabosky, R. McCormick. "Combustion of Fat and Vegetable Oils Derived Fuels in Diesel Engines". *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 24. 1998. pp. 125-164.
4. World Wide Fuel Chapter. 4th ed. Sept. 2006. pp. 5-20.
5. L.G. Shumacher, W. Wetherell, J. A. Fisher. "Cold Flow Properties of Biodiesel and Its Blends with Diesel Fuel". *Annual International Meeting ASAE*. 1999. pp. 320-328.
6. C. Huang, D. Wilson. "Improving the Cold Flow Properties of Biodiesel". *91st AOCS Annual Meeting*. 2000. pp. 128-135.
7. J. Delgado. *Procedimiento para producir combustibles biodiesel con propiedades mejoradas a baja temperatura*. Patente N.º ES 2.201.894 A1. 2004.
8. Jr. Soriano. "Ozonized vegetable oil as pour point depressant for neat biodiesel". *Fuel*. Vol. 85. 2006. pp. 25-31.
9. C. Chuang-Wei, L. G. Schumacher, G. J. Suppes. "Impacts of cold flow improvers on soybean biodiesel blend". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 27. 2004. pp. 485-491.
10. I. Lee, L. A. Johnson, E. G. Hammond. "Use of Branched-Chain Esters to Reduce the Crystallization Temperature of Biodiesel". *JAOCs*. Vol. 72. 1995. pp. 1150-1162.
11. R. O. Dunn, M. W. Shockley, M. O. Bagby. "Improving the low temperature properties of alternative diesel fuels: vegetable oil-derived methyl esters". *JAOCs*. Vol. 73. 1996. pp. 1719-1728.
12. M. E. Gonzalez. "Winterization of waste cooking oil methyl ester to improve cold temperature fuel properties". *Fuel*. Vol. 81. 2002. pp. 33-39.
13. I. Lee, L. A. Johnson, E. G. Hammond. "Reducing the crystallization temperature of biodiesel by winterizing methyl soyate". *JAOCs*. Vol. 73. 1996. pp. 631-636.
14. P. N. Benjumea, J. R. Agudelo, G. J. Cano. "Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiesel". *Scientia et Technica*. Año x. Vol. 24. 2004. pp. 169-175.
15. American Society for Testing and Materials. "Standard test method of cloud point of petroleum products". *ASTM designation: D2500-05*. Philadelphia. 2005.
16. American Society for Testing and Materials. "Standard test method for pour point of petroleum products". *ASTM designation: D97-05a*. Philadelphia. 2005.
17. American Society for Testing and Materials. "Standard test method of cold filter plugging point of diesel and heating fuels". *ASTM designation: D6371-05*. Philadelphia. 2005.
18. American Society for Testing and Materials. "Standard test method of hydrocarbon fuels by bomb calorimeter". *ASTM designation: D240-02*. Philadelphia. 2005.
19. American Society for Testing and Materials. "Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and the calculation of dynamic viscosity)". *ASTM designation: D445-02*. Philadelphia. 2005.
20. American Society for Testing and Materials. "Standard test method for distillation of petroleum products at atmospheric pressure". *ASTM designation: D86-05*. Philadelphia. 2005.
21. American Society for Testing and Materials. "Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels". *ASTM designation: D6751-03a*. Philadelphia. 2005.