

CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO DEL PROCESO DE VISCO-REDUCCIÓN, PARA LA CONVERSIÓN DE ACEITE VEGETAL, ACEITE DE ALGA Y BÚNKER

Alexander Davis Barquero¹ y Adolfo Ulate Brenes^{2*}.

^{1,2} Escuela de Ingeniería Química, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Universidad de Costa Rica, 11501-2060, San José, Costa Rica.

Recibido 13 de agosto del 2012; aceptado 30 de noviembre del 2012

Resumen

Mediante el empleo de un reactor de alta presión y alta temperatura, se simulan las condiciones de viscorreducción con el objetivo de producir combustibles verdes, sustituyendo una fracción de aceite combustible #6 por aceites vegetales. En una primera fase del proceso se establecen las condiciones de operación y se caracteriza la materia prima. Se utiliza un 25% (m/m) de sustitución con aceite vegetal de palma (*Elaeis guineensis*), castor (*Ricinus communis*), jatrofa (*Jatropha curcas*) y en otro caso de 10% de alga (*Undaria pinatifida*), 450 °C y 5 min como tiempo de reacción. Los productos obtenidos se compararon con los estándares utilizados en la Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE). Dentro de los resultados más importantes se encuentra que la sustitución de un 25% m/m de aceite vegetal aumenta en un 6,1% la fracción de diesel total y gasóleo, mejora el índice de cetano, disminuye la viscosidad, la cantidad de material aromático, y la cantidad de azufre con respecto al blanco de 100% búnker. Reactores de lecho fluidizado o sustitución con hidrógeno se recomiendan para lograr un mayor grado de saturación en futuras investigaciones.

Abstract

Through the use of a high pressure and high temperature reactor conditions a visbreaking is simulated, with the purpose of producing green fuels, replacing a fraction fuel oil #6 with vegetable oils. A 25% (m/m) of palm (*Elaeis guineensis*), castor (*Ricinus communis*), jatropha (*Jatropha curcas*) and 10% algae (*Undaria pinatifida*) oils, 450 ° C and 5 min of reaction time were utilize and the products were compared with the standards used by RECOPE. The replacement of 25% m/m by vegetable oil, increases by 6,1% the fraction of total diesel oil, improves the cetane index, decreases viscosity the amount of aromatic material and the amount of sulphur respect to 100% bunker The use of fluidized bed reactors or hydrogen mix for increase the saturated products are recommended for future research.

Palabras clave: aceite vegetal, combustible verde, aceite combustible #6, biodiesel, viscorreducción, aceite de palma (*Elaeis guineensis*), aceite de castor (*Ricinus communis*), jatrofa (*Jatropha curcas*) y aceite de alga (*Undaria pinatifida*).

Key words: vegetable oils, vegetable, visbreaking, palm oil (*Elaeis guineensis*), castor oil (*Ricinus communis*), jatropha oil (*Jatropha curcas*) and algae oil (*Undaria pinatifida*), fuel oil # 6.

* Autor para correspondencia: adolfo.ulate@ucr.ac.cr

I. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de nuevas fuentes energéticas ha generado una carrera contra el tiempo en el ámbito internacional, produciendo un ambiente de duda ante el cuestionamiento de si es posible disminuir la dependencia directa del petróleo [1]. Junto con este contexto surge un nuevo concepto de biocombustible, denominado combustible verde, producto de procesos de craqueo térmico, visco-reducción, craqueo catalítico e hidrogenación de biomasa, material de celulosa, aceites vegetales y algas. Este biocombustible comparado con el etanol y biodiesel, posee un mayor calor de combustión y una disminución significativa de las emisiones de material contaminante [2].

Un proceso de conversión térmica depende de varios factores pero los más significativos a considerar son la materia prima, temperatura, presión y tiempo de la reacción [3]. La materia prima que contiene altas concentraciones de aromáticos disminuye la velocidad de reacción respecto a materia prima de mayor contenido parafínico, esto ya que los procesos de condensación como producto de la descomposición de la materia prima aromática conducen a la formación de coque. Tanto la temperatura como el tiempo de reacción ejercen un efecto sobre el rendimiento y la calidad de los productos de la conversión térmica, a determinadas temperaturas son mutuamente sustituibles. Al aumentar la temperatura de reacción y disminuir el tiempo de residencia es posible obtener la misma profundidad de descomposición, que para una temperatura baja pero con mayor duración del proceso.

La descomposición térmica de los hidrocarburos comienza en el intervalo de 380 °C a 400 °C, al incrementar la temperatura, la velocidad de reacción aumenta, lo cual conduce a la formación de componentes ligeros y al incremento en la presión del sistema.

El aumento en la temperatura produce un incremento en el rendimiento a derivados gaseosos, no obstante tiene la particularidad de favorecer el contenido de hidrocarburos insaturados, lo cual en caso de buscar un mercado de combustibles disminuiría la oferta del producto, este comportamiento sería aprovechable si se tiene como objetivo otro tipo de industria como la de polímeros.

El efecto de la presión no es significativo respecto a la velocidad de reacción ni el rendimiento a naftas. Sin embargo, el incremento de la presión permite elevar la temperatura de ebullición de la materia prima y de los productos, así como la alteración del estado de fase en la unidad de reacción.

Las reacciones primarias (descomposición y deshidrogenación) no dependen de la presión, pero las reacciones secundarias (polimerización y condensación) se aceleran con el aumento de la presión. Por esta razón una conversión térmica con alta presión produce menor concentración de hidrocarburos insaturados con respecto a una en condiciones de baja presión.

La influencia de la presión en una conversión térmica en fase líquida de materia prima de clases pesadas, no es significativa. No obstante en fase mixta la presión contribuye a la homogenización de la materia prima, lo cual permite reducir tiempos de residencia y disminuir las pérdidas en forma de gas.

II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Selección reactor de alta presión en alta temperatura

Para simular el proceso de termo-conversión, se realiza una selección de un reactor de alta presión en alta temperatura que cumpla tanto con los requerimientos experimentales, como con las condiciones de seguridad requeridas. Se opta por reacondicionar un reactor de alta presión

Caracterización del producto del proceso de visco-reducción de aceites.

existente en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, el cual es de la compañía fabricante PARR INSTRUMENTS, modelo 4622 el cual cuenta con un sistema de calentamiento con resistencia de tipo eléctrica, control automático de temperatura y sistema de medición de presión con manómetro regulado hasta 30 MPa.

Condiciones de reacción

De acuerdo con la literatura, las temperaturas de ruptura de moléculas orgánicas de cadenas hidrocarbonadas son igual o superiores de 400 °C, sin embargo la composición de la materia prima define este valor [3]. Para el caso del bunker 6, se debe de utilizar 450 °C o superiores [4]. Este último criterio define la temperatura que se utiliza en la simulación del proceso.

La relación entre tiempo de reacción y temperatura está definida en otros estudios [5]. Por lo anterior se decide utilizar cinco minutos como tiempo de reacción.

Si bien es cierto la presión se relaciona con la conversión de la materia prima para este estudio se decide solo medirla y no se considera como variable de estudio. Las condiciones reales de viscorreducción la presión del sistema es de 3,4 MPa.

Caracterización de la materia prima

En los cuadros 1, 2, 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de caracterización realizadas a los aceites vegetales y de alga utilizados como materia prima en la mezcla con búnker. Al comparar las densidades de los cuatro aceites a utilizar, se observa que los derivados de la palma, jatrofa e higuera poseen valores cercanos a los 900 kg/m³ y el de alga presenta la mayor diferencia en este parámetro de caracterización, con 710 kg/m³. El alga *Undaria pinnatifida* posee como principal componente de los triacilglicéridos al ácido linoleico, que en comparación con los demás ácidos grasos posee el mayor número de insaturaciones, por lo tanto al incrementar el grado de ramificación, la densidad molecular tiende a disminuir.

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de Ingeniería Química de la UCR y Laboratorio de Servicios Analíticos a La Industria de la Escuela de Química de la UCR. (L.A.S.A.)

Cuadro 1. Propiedades físico-químicas para el aceite crudo de palma rojo (*Elaeis guineensis*).

Propiedad	Unidad	Valor	Método
Densidad 40 °C	kg/m ³	900	ASTM D1217
Índice refracción n _d ⁴⁰	Adimensional	1,462	ASTM D1218
Índice de Yodo	g/ 100 g aceite	54,9	A.O.C.S. 1-25
Índice de Saponificación	g KOH/g	0,18	LASA
Ácidos Grasos Libres	% m/m	3,5	LASA
Perfil triacilglicerolos			
Mirístico	%	No Detectado	
Palmítico	%	18,8	
Esteárico	%	9,6	
Oleico	%	52,8	Cromatografía
Linoleico	%	16,4	Gases
Araquidónico	%	No Detectado	LASA
Ricinoleico	%	No Detectado	
Palmitoleico	%	2,5	

Cuadro 2. Propiedades físico-químicas para el aceite de higuerilla (*Ricinus communis*).

Propiedad	Unidad	Valor	Método
Densidad 40 °C	kg/m ³	960	ASTM D1217
Índice refracción n _d ²⁰	Adimensional	1,478	ASTM D1218
Índice de Yodo	g/ 100 g aceite	85,68	A.O.C.S. 1-25
Índice de Saponificación	g KOH/g	0,18	LASA
Ácidos Grasos Libres	% m/m	4,7	LASA
Perfil triacilgliceroles			
Mirístico	%	0,7	Cromatografía Gases LASA
Palmítico	%	28,4	
Estearico	%	3,2	
Oleico	%	25,0	
Linoleico	%	6,1	
Araquidónico	%	No Detectado	
Ricinoleico	%	36,6	
Palmitoleico	%	No Detectado	

Cuadro 3. Propiedades físico-químicas para el aceite de jatrofa (*Jatropha curcas*).

Propiedad	Unidad	Valor	Método
Densidad 40 °C	kg/m ³	920	ASTM D1217
Índice refracción n _d ²⁰	Adimensional	1,466	ASTM D1218
Índice de Yodo	g/ 100 g aceite	77,14	A.O.C.S. 1-25
Índice de Saponificación	g KOH/g	0,18	A.O.C.S. 8b-90
Ácidos Grasos Libres	% m/m	0,6	LASA
Perfil triacilgliceroles			
Mirístico	%	No Detectado	Cromatografía Gases LASA
Palmítico	%	11,8	
Estearico	%	6,0	
Oleico	%	46,6	
Linoleico	%	32,0	
Araquidónico	%	2,4	
Ricinoleico	%	No Detectado	
Palmitoleico	%	1,3	

Caracterización del producto del proceso de visco-reducción de aceites.

Cuadro 4. Propiedades físico-químicas para el aceite alga (*Undaria pinnatifida*)

Propiedad	Unidad	Valor	Método
Densidad 40 °C	kg/m ³	710	ASTM D1217
Índice refracción n _d ²⁰	Adimensional	1,399	ASTM D1218
Índice de Yodo	g/ 100 g aceite	87,45	A.O.C.S. 1-25
Índice de Saponificación	g KOH/g	0,17	A.O.C.S. 8b-90
Ácidos Grasos Libres	% m/m	0,9	LASA
Perfil triacilgliceroles			
Mirístico	%	No Detectado	
Palmítico	%	11,2	
Esteárico	%	10,8	
Oleico	%	31,3	Cromatografía
Linoleico	%	39,6	Gases
Araquidónico	%	2,4	LASA
Ricinoleico	%	No Detectado	
Palmitoleico	%	1,3	

Por otro lado, el cuadro 5 presenta los resultados del aceite combustible búnker empleado como sustrato de reacción en mezcla, con el fin de simular el proceso semi-continuo existente en la Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE). Este búnker corresponde a un aceite combustible equivalente al fondo de destilación atmosférico y se obtuvo de la sección de calderas del Plantel de Distribución del Alto de Ochomogo RECOPE. El búnker fue caracterizado en el Laboratorio de Producción en Limón.

Cuadro 5. Propiedades físico-químicas del búnker de fondo de destilación

Prueba	Unidad	Método de Prueba	Valor
Contenido de azufre	% m/m	ASTM D-2622	2,47
Densidad a 25 °C	kg/m ³	ASTM D-1480	930
Viscosidad a 50 °C	cSt	ASTM D445	1700
Temperatura de inflamación	° C	ASTM D-3838	168
Agua y sedimento	% v/v	ASTM D-1796	0,2
Punto de fluidez	°C	ASTM D-97	5
Residuos carbonosos	% m/m	ASTM D-189	10,7
Contenido de cenizas	% m/m	ASTM D-482	0,05

III. RESULTADOS

Caracterización de la fracción de diesel total y gasóleo del producto de visco-reducción de las mezclas aceite-búnker

Una vez caracterizadas las materias primas a utilizar para la simulación del proceso de visco-reducción a escala, se realiza la experimentación con mezclas al 25 % m/m de aceite, utilizando los tipos: crudo de palma roja del tipo *Elaeis guineensis*, higuierilla (*Ricinus communis*), jatrofa (*Jatropha curcas*) y el alga marina *Undaria pinnatifida*. Esta última se emplea al 10% por

disponibilidad de materia prima. Las muestras se identifican como P25, H25, J25, A10, respectivamente.

Se realiza el proceso de reacción para cada sistema. El producto obtenido se procede a separar mediante destilación al vacío, a un corte de 400 °C TBP (temperatura de ebullición real) según la norma ASTM D-1160, con el propósito de recuperar la fracción de diesel total y gasóleo formada en cada muestra. Además, se efectúa un ensayo con 100% búnker (denominado como blanco) a las mismas condiciones de operación especificadas para el proceso a escala de viscorreducción, con el fin de comparar las características de los combustibles obtenidos.

En la figura 1 se observa el gráfico con las curvas de destilación al vacío de las mezclas de hidrocarburos, así como la muestra de control, que no presenta puntos de inflexión en el intervalo de 200 a 400 °C.

Al realizar la mezcla con los aceites, se nota un incremento en las fases, principalmente para el aceite de palma y jatrofa; el de higuierilla aún continua en la última sección de destilación por debajo de la curva del blanco. Finalmente el derivado de la mezcla al 10% de aceite de alga es de gran importancia, ya que se observa la disminución en la pendiente de la curva, aunque no lo suficiente para generar que la inflexión que incremente las fracciones de diesel total y gasóleo en este intervalo.

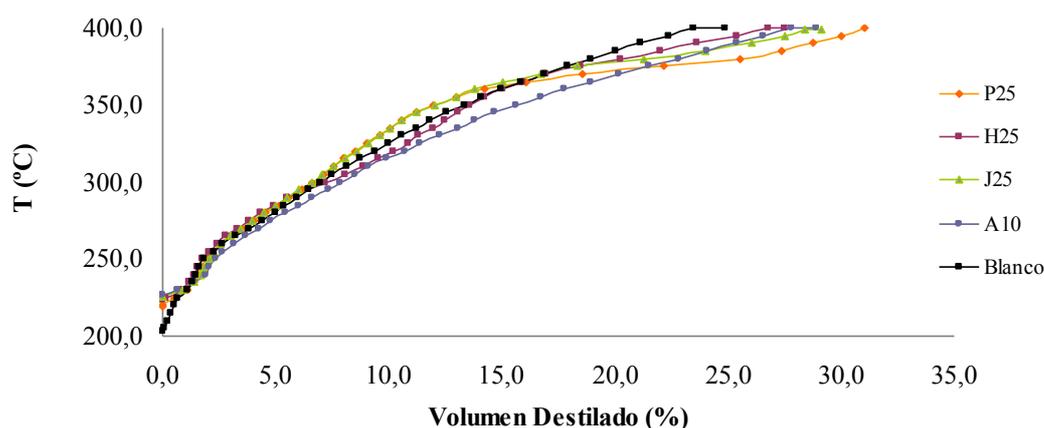


FIGURA 1. Curvas de destilación al vacío de 1 mm Hg para muestras de 200 mL, corte a 400 °C según ASTM D-1160.

Por lo tanto al mezclar aceite en búnker para el proceso de termo-conversión, se beneficia la destilación multi-componentes al aumentar específicamente la fracción de diesel total y gasóleo. En el cuadro 6 se presenta el porcentaje respectivo de volumen recuperado, en donde se ve que el ensayo del blanco genera la menor recuperación con un 24,9%, mientras que al realizar una mezcla con aceite de palma se alcanza un máximo de 31,0%, lo que representa un incremento del 6,1% con respecto al blanco.

El porcentaje de azufre en las muestras es de suma importancia para comprobar el craqueo de un producto distinto al generado del rompimiento del búnker. Para la muestra blanco se obtiene un porcentaje de azufre de 1,5283%, mientras que para las mezclas de palma, higuierilla y jatrofa ningún valor sobrepasa los 1,1343%, incluso para la palma se logra disminuir hasta 1,0379%. Por lo tanto, hay evidencia de que la mezcla con aceites vegetales produce una disminución de hasta un 0,5% en el azufre del producto destilado con respecto al ensayo blanco sin mezcla, utilizando un remplazo de un 25% de combustible fósil. Para el caso del aceite de alga

Caracterización del producto del proceso de visco-reducción de aceites.

donde la concentración es menor en la mezcla inicial, se produce un valor de 1,5583%. Por lo tanto no es posible concluir si este sustrato disminuye la cantidad de azufre presente.

Cuadro 6. Caracterización producto destilado al corte 400 °C diesel total-gasóleo

Propiedad	Unidad	Blanco	P 25	H 25	J 25	A 10
Densidad 25 °C	kg/m ³	894	899	895	884	895
Índice refracción n _D ²⁰	Adim.	1,529	1,507	1,509	1,510	1,527
Índice de Yodo	g/ 100 g	50,94	84,66	68,84	54,75	63,42
Viscosidad a 50 °C	cSt	6,8	9,3	7,5	9,9	7,8
Contenido de azufre	% m/m	1,5283	1,0379	1,1342	1,1343	1,5585
Índice de cetano	Adim.	45,3	45,1	45,4	49,0	45,0
Punto inicial TBP	°C	202,9	219,7	224,1	226	226,4
TBP 50% destilado	°C	345	363	351	363	345
Punto de corte TBP	°C	400	400	400	400	400
Volumen recuperado	%v/v	24,9	31,0	27,5	29,1	28,9
Masa molecular relativa	g/mol	283	302	301	301	283
Distribución de carbonos						
Carbonos de alcanos	% m/m	40	59,3	56,6	56,9	44,7
Carbonos de aromáticos	% m/m	54,5	27,8	37,9	37,7	52
Carbonos de condensados	% m/m	60	40,7	43,4	43,14	55,3
Carbonos de naftenos	% m/m	5,4	12,91	5,5	37,7	3,3

Blanco: Corte producto de reacción de búnker 100%; P25: Corte mezcla de reacción de palma al 25%; H25: Corte mezcla de reacción de higuera al 25%; J25: Corte mezcla de reacción de jatrofa al 25%; A10: Corte mezcla de reacción de alga al 10%.

Respecto al índice de yodo muestra que todos los productos derivados de mezclas con aceites presentan un mayor número de enlaces no saturados, lo cual indica que el rompimiento molecular se está dando en la molécula del aceite, ya que posee mayor extensión y menor ramificación respecto a los naftenos del búnker. Además, el aceite de alga aún al estar en mezcla al 10%, no presenta la menor cantidad de insaturaciones. De acuerdo a los resultados, el derivado del aceite de jatrofa, es el producto con menor rompimiento de insaturaciones.

Del análisis de distribución de carbonos, se observa como la cantidad de alcanos presentes se incrementa, principalmente en el aceite de palma con un 59,3%, el derivado del aceite de jatrofa con 56,9%, y la higuera presenta una valor de 56,6%. El producto del blanco tiene la menor cantidad de alcanos con solo un 40%, mientras que al realizar la mezcla de aceite de alga al 10% se logra aumentar. La cantidad de hidrocarburos aromáticos disminuye del 54,5% del blanco, hasta 27,8% para el caso del producto del aceite de palma. Esta variación es de suma importancia ya que baja la carga de componentes tóxicos generados ante el eventual uso como combustible de venta a nivel nacional.

El índice de cetano no es un parámetro normado del diesel total según reglamentos técnicos. Sin embargo, es importante utilizarlo como punto de comparación, ya que en todos los casos se obtiene un combustible con cetanaje mayor a 45, por lo que todos cumplen con las especificaciones del diesel ligero. Además por tener todos los productos un punto de inicio por encima de los 200 °C, se espera un punto de inflamación característico del diesel pesado para un mínimo de 87 °C, según promedios del manual de productos de la Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE).

Al analizar la viscosidad a 50 °C, se observa que todas las muestras derivadas de aceites presentan una mayor viscosidad respecto al blanco de búnker, no obstante aún para el valor más alto de 9,9 cSt, para el producto de la jatrofa, este valor se encuentra por debajo de la viscosidad promedio del diesel pesado, según el manual de productos de RECOPE, valor que se aproxima a los 18 cSt. Por lo tanto, para efectos de disminución de capacidad de bombeo, sin perder de vista la importancia de la lubricidad en los combustibles específicos tipo diesel, el producto correspondiente a la fracción destilada cumple con el parámetro de viscosidad de regulación interno de refinería.

Caracterización global del producto de visco-reducción de la mezcla aceite-búnker de fondo de destilación atmosférica

A partir de la caracterización de las fracciones de diesel y gasóleo, se obtiene que los productos con características superiores respecto al blanco en viscorreducción, son los derivados de la mezcla con aceite de palma, por lo tanto se procede a realizar un ensayo adicional. Para esto se mantienen las condiciones de reacción: la temperatura de 450 °C, 25% en mezcla de aceite crudo de palma rojo y 5 min de reacción.

Al finalizar el proceso de reacción se almacenan los gases en una bolsa de muestreo, de $3 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ y se envían a analizar. Se realiza una destilación al vacío a un corte riguroso según la unidad existente de 360 °C, del producto líquido final, con el fin de separar específicamente el gasóleo y conservar en el balón la fracción equivalente al búnker de viscorreducción.

En el cuadro 7 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del producto líquido equivalente a la fracción rigurosa de diesel total y gasóleo. La densidad cumple la norma y se encuentra en el intervalo de 830 a 860 kg/m^3 para el aceite combustible diesel, una viscosidad a 50 °C de 4,4 cSt, la cual se encuentra por abajo del intervalo de 5,5 a 25 cSt en el que se clasifica como gasóleo, por lo tanto se aceptaría como un diesel ligero. El contenido de azufre presente en la muestra es de 1,0725% no cumple con los requerimientos para utilizarse en sistemas de combustión interna, pero si se encuentra por abajo del mínimo reportado en gasóleo de 1,0800% derivado del petróleo.

El índice de cetano de 52,3 representa un punto de ebullición medio adecuado y superior al del diesel ligero que se utiliza en la actualidad (48,3 según los promedios obtenidos en el manual de productos); siendo un buen indicativo, ya que un número alto de cetano, muestra nuevamente la obtención de un producto distinto respecto al craqueo del búnker y evidencia la viabilidad a nivel de reacción química del proceso con mezcla de aceite. Es importante destacar que a la temperatura de corte de 360 °C el volumen recuperado disminuye, en este caso hasta 14,2%, al igual que la cantidad de alcanos presentes con 19,1%, además presenta mayor cantidad de aromáticos respecto al material saturado de las moléculas. Por lo tanto para recuperar el máximo de producto ligero como fracción de diesel se debe realizar el corte a mayor temperatura.

Caracterización del producto del proceso de visco-reducción de aceites.

Cuadro 7. Caracterización del producto con palma al 25% destilado corte 360 °C.

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad 25 °C	kg/m ³	855
Gravedad API	Adimensional	34
Índice refracción n _D ²⁰	Adimensional	1,5025
Índice de yodo	g/ 100 g aceite	54,96
Viscosidad a 50 °C	cSt	4,4
Contenido de azufre	% m/m	1,0725
Índice de cetano	Adimensional	52,3
Punto inicial TBP	° C	219,3
TBP 50% destilado	° C	305
Punto de corte TBP	° C	360
Volumen recuperado	%v/v	14,2
Masa molecular relativa	g/mol	245
Distribución de carbonos		
Carbonos de alcanos	% m/m	19,1
Carbonos de aromáticos	% m/m	44,7
Carbonos de condensados	% m/m	81
Carbonos de naftenos	% m/m	36,3

Respecto al residuo superior a 360 °C, se cataloga como búnker de palma. En el cuadro 8 se presentan los resultados obtenidos según la caracterización con los respectivos métodos ASTM del Laboratorio de Control de Producción de RECOPE.

Cuadro 8. Caracterización del búnker de palma destilado corte mayor a 360 °C

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad 25 °C	kg/m ³	980
Gravedad API	Adimensional	12,9
Viscosidad a 50 °C	cSt	1570
Contenido de azufre	% m/m	1,9552
Punto de corte TBP	° C	+360
Carbón CONRADSON	% m/m	13,05
Calor de combustión	MJ/kg	36,010
Compatibilidad	Adimensional	1

La densidad es semejante al producto de viscorreducción presentado en la sección de caracterización del búnker de la unidad existente. La viscosidad de 1570 cSt a 50 °C, es menor a la del producto de búnker típico, el cual tiene un valor promedio de 1685 cSt a esta misma temperatura, lo cual representa una disminución de 115 cSt.

La cantidad de azufre es de 1,9552% y se encuentra por arriba del valor típico de 1,91% para el promedio del residuo. Este incremento muestra que la cantidad de azufre por arriba de la media es ocasionada por el craqueo de una molécula distinta a la del búnker de residuo atmosférico. Esto se nota porque la disminución de azufre de aproximadamente 0,5% en la fracción de diesel

obtenida, es el exceso que se encuentra en el búnker, lo cual refuerza que el sustrato de aceite vegetal en mezcla es el que presenta la principal reacción de craqueo térmico.

Respecto al contenido de residuo carbonos CONRADSON para la muestra del búnker producto de la reacción de mezcla con aceite de palma al 25%, se obtiene un valor de 13,05%, menor con respecto al 15,5% típico del producto de la unidad existente, por lo tanto hay un beneficio directo en la disminución de residuo carbonoso y formación de coque.

Para corroborar que cumple con las características adecuadas para su utilización como combustible, se realiza una medición del calor de combustión. La prueba da valor de 36,010 MJ/kg, semejante al valor típico de 40 MJ/kg que posee el búnker de venta para hornos y calderas a nivel nacional, según el promedio del manual de productos de RECOPE. Para comprobar que no existen problemas de separación se realiza una prueba de compatibilidad; en la escala del método ASTM D-2781, El valor que se obtiene es de 1, lo cual indica que no se producen problemas por separación de fases y se considera el producto físicamente compatible.

La caracterización el producto ligero gaseoso obtenido se realiza mediante cromatografía HPLC. Los resultados obtenidos para el análisis de la muestra se presentan en el cuadro 9.

Cuadro 9. Caracterización del producto gaseoso de viscorreducción de la mezcla de aceite crudo de palma al 25%.

Analito	Resultado
Propano	53,85
Isobutano	23,13
n-Butano	23,01

La presencia del butano e isobutano se explica por el rompimiento molecular de las cadenas hidrocarbonadas del aceite, los cuales generan reacciones de sustitución estabilizando el doble enlace del craqueo térmico en las moléculas de mayor tamaño, dejando saturadas las menores: propano y butano. Además, por las condiciones de reacción, el butano tiende a isomerizar a temperaturas mayores a 400 °C, con lo cual se explica la composición de material gaseoso.

IV. CONCLUSIONES

- La alimentación de búnker enriquecido con aceite vegetal mejora la conversión de viscorreducción experimental en un 6,1% de la fracción equivalente de diesel total y gasóleo.
- La calidad de la fracción diesel total y gasóleo que se obtiene cuando se utiliza la alimentación enriquecida con aceite vegetal, mejora en cuanto a índice de cetano, aumento de fase de alcanos, menor viscosidad, menor cantidad de material aromático y disminución de la cantidad de azufre con respecto al blanco de 100% búnker.
- El producto de viscorreducción de mezclas aceite-búnker presenta un mayor porcentaje de diesel total en la fase de 200 °C a 400 °C con respecto al blanco. Específicamente 24,9%, 31,0%, 27,5%, 29,1%, 28,9%, para la muestra blanco, palma 25%, higuera 25%, jatrofa 25% y alga al 10%, respectivamente.
- Según la distribución de carbonos el producto de corte a 400 °C con mayor porcentaje de alcanos es el derivado del aceite de palma, con un 59,3%.

Caracterización del producto del proceso de visco-reducción de aceites.

- El producto de corte a 400 °C con menor porcentaje de azufre es el derivado del aceite de palma, con 1,0379%, mientras que para el blanco de 100% búnker se obtiene un valor de 1,5283%.
- El producto de corte a 360 °C derivado de la palma a 25%, 450 °C y 5 min de reacción, cumple con las especificaciones de densidad, viscosidad e índice de cetano respecto al aceite combustible diesel, y de azufre con respecto al combustible tipo gasóleo.
- El búnker producto de la viscorreducción de la mezcla con aceite crudo de palma al 25% cumple con las especificaciones de densidad, viscosidad, contenido de azufre, carbón CONRADSON, calor de combustión y prueba de compatibilidad.
- El producto gaseoso de la viscorreducción de la mezcla palma al 25% está compuesto de 53,85% propano, 23,13% isobutano y 23,01% n-butano.

V. REFERENCIAS

1. Heinemann, H. *The Chemistry and Technology of Petroleum* (4ª Edición). Estados Unidos: Taylor and Francis, 2006.
2. Lima, D.G., Soares, V.C.D., Ribeiro, E.B., Carvalho, D.A., Cardoso, E.C.V, Rassi, F.C., Mundim, K.C., Rubim, J.C., Suarez, P.A.Z. *J. Anal. App. Pyrol.*, **2004**, 71, 987-996.
3. Rásina, M. *Química y tecnología del petróleo y el gas* (1ª Edición). Moscú, Rusia: Editorial Mir, 1988.
4. Nelson, W. *Petroleum Refinery Engineering* (4ª Edición). New York, Estados Unidos: Mc Graw-Hill, 1969.
5. Handwerk, G. E. *Petroleum Refining* (4ª Edición). New York, Estados Unidos: Marcel Dekker, Inc., 2001.
6. ASTM D-1160. (n.d.). Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Reduced Pressure . *Método de Prueba Estándar para Destilación de Productos de Petróleo a Presión Reducida* .
7. ASTM D-1218. (n.d.). Standard Test Method for Refractive Index and Refractive Dispersion of Hydrocarbon Liquids . *Método de Prueba Estándar para Índice de Refracción e Índice de Refracción de Hidrocarburos Líquidos* .
8. ASTM D-1796. (n.d.). Standard Test Method for Water and Sediments in Fuel Oils by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure). *Método de Prueba Estándar para Agua y Sedimentos en Aceites Combustibles por el Método de la Centrífuga (Procedimiento de Laboratorio)* .
9. ASTM D-189. (n.d.). Standard Test Method for Conradson Carbon Residue of Petroleum Products. *Método de Prueba Estándar para Residuo de Carbón Conradson de Productos de Petróleo*.
10. ASTM D-2622. (n.d.). Standard Test Method for Determination of Sulfur in Petroleum Products by Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometric . *Método de Prueba Estándar para Determinación de Azufre Total en Productos del Petróleo por Espectrometría de Fluorescencia de Dispersión de Rayos X* .
11. ASTM D-287. (n.d.). Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products . *Método de Prueba Estándar para Gravedad API del Petróleo Crudo y Productos del Petróleo* .
12. ASTM D-3238. (n.d.). Standard Test Method for Calculation of Carbon Distribution and Structural Group Analysis of Petroleum Oils by the n-d-M Method . *Método de Prueba Estándar para el Cálculo de la Distribución de Carbono y Grupos Estructurales del los Aceites del Petróleo por el Método n-d-M*. ASTM D-4057. (n.d.). Standard Practice for Manual Sampling

- of Petroleum and Petroleum Products . *Práctica Estándar para Muestreo Manual de Petróleo y Productos de Petróleo* .
13. ASTM D-445. (n.d.). Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and the Calculation of Dynamic Viscosity *Método de Prueba Estándar para Viscosidad Cinemática de Líquidos Transparentes y Opacos* . *Método de Prueba Estándar para Viscosidad Cinemática de Líquidos Transparentes y Opacos (y el Cálculo de la Viscosidad Dinámica)*).
 14. ASTM D-613. (n.d.). Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil. *Método de Prueba Estándar para Número de Cetano de Aceite Combustible Diesel* .
 15. ASTM D-93. (n.d.). Standard Test Method for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester. *Método de Prueba Estándar para Punto de Inflamación por el Probador Pensky-Martens de Copa Cerrada*.