

Caracterización del biodiesel obtenido del aceite de *Jatropha curcas* L

P. A. Rodríguez Ramos^a, A. Hernández Milán^b, E. A. Melo Espinosa^a, L. M. Zumalacárregui de Cárdenas^c, O. Pérez Ones^c, L. Pérez Ruíz^b y R. Piloto-Rodríguez^a

^aGrupo Combustibles Alternativos, Facultad Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae. Ave. 114, No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda. Marianao, La Habana, Cuba. ^bCentro de Investigaciones del Petróleo. ^cGrupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae.

Characterization of biodiesel from Jatropha curcas L oil

Caracterització del biodièsel obtingut de l'oli de Jatropha curcas L

RECEIVED: 3 MAY 2017; REVISED: 9 AUGUST 2017; ACCEPTED: 13 AUGUST 2017

SUMMARY

In this paper, the characterization of the biodiesel obtained from *Jatropha curcas* L oil was carried out and its properties were compared with the specifications of the Brazilian standard. The best operation conditions were determined for the transesterification reaction finding that at 60°C, concentration of catalyst 0.8 % wt., reaction time 30 minutes and methanol/oil molar rate 9:1, if sodium hydroxide is used, or 6:1 if sodium methoxide is used, conversions higher than 96 % are reached. Biodiesel was tested on a single-cylinder diesel engine Petter, vertical type to verify its performance when biodiesel or diesel fuels were used. The degree of influence was established, when diesel fuel was completely substituted by biodiesel from *Jatropha curcas* L oil, at fixed torque and the fuel specific consumption (401-507 g/kW·h) by a gravimetric method was measured for a B100 (100 % biodiesel).

Keywords: Biofuel; biodiesel; *Jatropha curcas* L; diesel motors.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la caracterización del biodiesel obtenido a partir de aceite de *Jatropha curcas* L y se compararon sus propiedades químico-físicas con las especificaciones de la norma brasileña. Se determinaron las mejores condiciones de operación para la realización de la reacción de transesterificación encontrando que a 60°C, concentración de catalizador 0,8% (máscico), tiempo de reacción 30 minutos y razón molar metanol/aceite 9:1 si se utili-

za hidróxido de sodio, o 6:1 si se utiliza metóxido de sodio, se alcanzan conversiones superiores al 96%. El biodiesel se probó en un motor diesel mono cilíndrico marca Petter, tipo vertical para verificar sus prestaciones, empleando biodiesel con combustible diesel; se estableció el grado de afectación del motor al sustituir completamente el combustible diesel por biodiesel del aceite de *Jatropha curcas* L a torque fijo y se midió el consumo específico del combustible (401-507 g/kW·h) para un B100 (biodiesel al 100%) por el método gravimétrico.

Palabras claves: Biocombustible; biodiesel; *Jatropha curcas* L; motores diesel.

RESUM

En el present treball es va realitzar la caracterització del biodièsel obtingut a partir d'oli de *Jatropha curcas* L i es van comparar les seves propietats químicofísiques amb les especificacions de la norma brasilera. Es van determinar les millors condicions d'operació per a la realització de la reacció de transesterificació trobant que a 60°C, concentració de catalitzador 0,8% (màssic), temps de reacció 30 minuts i raó molar metanol/oli 9: 1 si s'utilitza hidròxid de sodi, o 6: 1 si s'utilitza metòxid de sodi, s'assoleixen conversions superiors al 96%. El biodièsel es va provar en un motor dièsel mono cilíndric marca Petter, tipus vertical per verificar les seves prestacions, emprant biodièsel amb combustible dièsel; es va establir el grau d'afectació

*Corresponding autor: parr@ceim.cujae.edu.cu

del motor en substituir completament el combustible dièsel per biodièsel de l'oli de *Jatropha curcas* L a torque fix i es va mesurar el consum específic de combustible (401-507 g/ kW·h) per a un B100 (biodièsel al 100%) pel mètode gravimètric.

Paraules clau: Biocombustible; biodièsel; *Jatropha curcas* L; motors dièsel.

1. INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles son cada vez más difícil de adquirir, desde el punto de vista tecnológico, además de que causan daños irreversibles al medioambiente. La búsqueda de fuentes alternativas a los combustibles fósiles ha dado lugar a los estudios de biocombustibles, productos obtenidos, principalmente a partir de materia prima vegetal, como la soja, la colza o el maíz. El interés medioambiental de la biomasa reside en que siempre se obtenga de una forma renovable y sostenible¹.

La producción y explotación de biocombustibles como una alternativa energética para la sustitución paulatina y el alargamiento del tiempo de vida de los combustibles fósiles tradicionales, es hoy, un tema de primer orden en el desarrollo tecnológico. La producción de biocombustibles puede generar contradicciones asociadas a la crisis alimentaria, si no se maneja adecuadamente.

En Cuba, la matriz energética se sustenta fundamentalmente en el consumo e importación de combustibles fósiles^{2,3}. El uso se extiende a casi todos los sectores de la industria cubana, desde la generación de electricidad hasta el transporte⁴. En este contexto, el uso e integración armónica de las energías renovable pueden contribuir a disminuir y descentralizar la dependencia energética sobre los combustibles fósiles y los problemas medioambientales^{5,6,7}.

Los aceites vegetales representan una materia prima prometedora para la producción de biocombustibles, sobre todo aplicados a motores diesel, debido fundamentalmente a que son biodegradables y se obtienen a partir de materia primas renovables las cuales se encuentran distribuidas a nivel global. Para obtener un biocombustible a partir de aceites vegetales es necesario modificar algunas de sus propiedades físico-químicas (por ejemplo viscosidad, contenido de ácidos grasos libres, fosfolípidos, esteroides, agua, entre otras)⁸. Con la transesterificación se logra obtener un biocombustible, llamado biodiesel, cuyas propiedades físico-químicas están estandarizadas (por ejemplo, ASTM D6751, EN 14214, entre otras) y se comparan con las del combustible diesel⁹.

La catálisis básica homogénea es, actualmente, el proceso más utilizado para la producción de biocombustibles, con la generación de biodiesel (ésteres de ácidos grasos) y glicerina a partir de aceite vegetal o grasas animales (triglicéridos). Algunas desventajas están presentes en este proceso, tales como: las etapas de separación y purificación de la glicerina son las de mayor costo, el aceite debe poseer bajo contenido

de ácidos grasos libres, hay riesgo de contaminación del producto por el catalizador, así como la imposibilidad de su reutilización. Por estas consideraciones este proceso aún está lejos de estar optimizado.

Jatropha curcas L comúnmente llamado Piñón de botija, es una planta oleaginosa, con gran facilidad de siembra, cultivo, mantenimiento y cosecha, tiene altos rendimientos, no es atacada por insectos, ni dañada por el ganado y no es comestible. Es una variedad permanente, favorecida por sus condiciones geográficas y climáticas.¹⁰

Por este motivo en este trabajo se caracterizó el biodiesel obtenido a partir de aceite de *Jatropha curcas* L, de acuerdo a especificaciones internacionales y pruebas en motor diésel, para las mejores condiciones de la reacción de transesterificación en el intervalo estudiado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se determinaron las mejores condiciones para la reacción de transesterificación del aceite de *Jatropha curcas* L utilizando catalizadores homogéneos. Se verificó la influencia del tipo y concentración de catalizador, del tiempo de reacción y de la cantidad de metanol a utilizar sobre el rendimiento y la concentración de los productos finales (biodiesel y glicerina), utilizando herramientas de diseño de experimentos.

2.1 Caracterización de las materias primas y productos

El Centro de Aplicaciones Tecnológicas para el Desarrollo Sostenible (CATEDES) de Cuba donó las muestras de aceite de *Jatropha curcas* L usadas en la producción del biodiesel. El combustible diesel regular se donó por la refinería Nico López y cumple con las especificaciones de calidad establecidas. El metanol utilizado tiene pureza de 99,9%. Se usaron como catalizadores el hidróxido de potasio y sodio en forma de metóxido; seleccionados teniendo en cuenta su relación efectividad/costo y se suministraron por la compañía CBMM S.A.

Los ensayos para la caracterización del aceite de *Jatropha curcas* L y del biodiesel se realizaron siguiendo las normas internacionales aprobadas para ello. En las tablas de resultados se presenta la norma correspondiente a cada ensayo realizado.

2.2 Proceso básico de obtención del biodiesel de *Jatropha curcas* L

La esterificación es el proceso por el cual se sintetiza un éster. El éster es un compuesto derivado de la reacción química entre un ácido carboxílico y un alcohol. En este caso, se realiza entre los ácidos grasos libres presentes en el aceite de *Jatropha curcas* L y el metanol, tal y como se describe en el siguiente epígrafe. Los ácidos carboxílicos reaccionan con los alcoholes en presencia de catalizadores de la reacción, los cuales por lo general son un ácido fuerte, con la finalidad de formar un éster a través de la eliminación de una molécula de H₂O, pero también se emplean catalizadores

básicos. Para este trabajo se realiza la etapa previa de esterificación del aceite con una relación molar metanol/aceite 5:1, a 60°C y utilizando 0,1% de KOH como catalizador. Una vez reducido el contenido de ácidos grasos libres en el aceite vegetal es que se procede a la etapa de transesterificación.

La transesterificación consiste en una secuencia de tres reacciones reversibles consecutivas en la que se esterifica cada uno de los ácidos grasos unidos al glicerol y que su conversión se garantiza con un exceso de metanol para desplazar el equilibrio a la formación de los productos. Entre los catalizadores más usados se encuentran los álcalis (hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, alcóxido de sodio y potasio, etc.). En esta investigación fue seleccionada la catálisis básica aplicando dos diseños factoriales independientes tal como se describe en 2.4 y 2.5, donde se variaron el tiempo de reacción, la concentración del catalizador y la relación molar, manteniendo fijas la temperatura en 60°C y presión atmosférica.

2.3 Etapa de pre-esterificación

La pre-esterificación consistió en dos etapas de esterificación a partir de 300 g de aceite con adición de metanol a razón molar metanol/aceite 5: 1 y catalizador. Se realizaron en un vaso de precipitado con agitación a temperatura de reflujo del metanol. Se trabajó a 0,1 MPa, 60°C y 500 rpm. En la etapa 1 se utilizó 0,1% de KOH como catalizador. En la etapa 2 no se utilizó catalizador. Entre la etapa 1 y 2 la muestra se secó a 130°C. Al finalizar la etapa 2 el aceite esterificado se lavó y secó a 130°C.

2.4 Reacción de transesterificación

Los experimentos se realizaron en un reactor tipo autoclave PARR 4842 (Parr Instrument Inc.), de acero inoxidable, volumen útil de 300 mL, presión máxima de trabajo 68 MPa, con agitación y manta externa para calentamiento. Se controló la temperatura y la presión.

La agitación fue constante e igual a 500 rpm. En cada experimento se utilizaron 100 g de aceite esterificado y una cantidad de metanol que variaba de acuerdo con la razón molar metanol/aceite y la cantidad de catalizador correspondiente. Las variables independientes fueron tiempo de reacción de transesterificación, concentración de catalizador y razón molar metanol/aceite.

Al finalizar cada reacción, el producto se lavó una vez con solución de ácido cítrico al 0,015%, para neutralizar el catalizador básico, y posteriormente con agua a 45°C cuatro veces. Posteriormente se realizó el secado a 130°C, para eliminar el metanol y el agua y finalmente se pasó un flujo de nitrógeno.

2.5 Diseño de experimentos

Para estudiar el efecto conjunto del tiempo de reacción, concentración de catalizador y razón molar metanol/aceite sobre las variables de respuesta se utilizó un diseño de experimentos factorial, 2³ con tres puntos centrales. Los niveles de las variables se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Niveles de las variables del diseño experimental

Variables independientes	Nivel Bajo	Nivel Alto
Tiempo (min) X1	30	60
Concentración de catalizador (% másico) X2	0,4	0,8
Razón molar metanol/aceite X3	6	9

2.5.1 Variables respuesta analizadas en la producción de biodiesel

Para la selección de las mejores condiciones de operación se analizó el comportamiento de las siguientes variables respuesta: Rendimiento (mínimo 92%); Viscosidad; Contenido de ésteres; Glicerina total (máximo 0,38%); Acidez (máximo 1%) y Conversión (Xa).

Para la cuantificación de estos parámetros se aplicaron las ecuaciones (1)-(3):

$$\text{Ésteres totales} = \frac{\text{masa de éster}}{\text{masa de biodiesel}} \quad (1)$$

Las masa de ésteres se determinó por la masa atómica de los residuos de ácidos grasos y los grupos hidroxilo que se adicionan como resultado de la reacción de transesterificación a partir de los resultados del ensayo cromatográfico.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{masa de biodiesel}}{\text{masa de aceite}} \quad (2)$$

$$\text{Conversión (Xa)} = \frac{1 - \text{glicerina total}}{\text{gmt}} \times 100 \quad (3)$$

Donde gmt es el porcentaje del radical glicerina en la molécula de triglicérido; se considera aproximadamente 10,5%.

2.6 Prueba en motores diesel

Las pruebas en el motor se desarrollaron en condiciones estables de carga. Se evaluó el consumo específico de combustible, así como la temperatura de los gases de escape utilizando un termopar tipo K conectado a un panel de control ubicado en la sala de pruebas. El motor usado tiene un cilindro 0,659 L, con una razón de compresión 16,5:1 y usa agua como medio de enfriamiento.

El comportamiento del torque efectivo (Te, N·m) y la frecuencia de rotación del motor (n, rpm) se registraron directamente del panel de control ubicado en la sala de pruebas. El consumo específico de combustible (CEC, g/kW·h) se determinó a partir del gasto de horario combustible (Gh, kg/h), para lo cual se utilizó balanza digital Mettler-Toledo GmbH IND425 con una precisión de 0,01 g y las ecuaciones (4)-(6) que se muestran a continuación ¹¹:

$$Ne = n \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \left(\frac{Te}{1000} \right) \quad (4)$$

$$Gh = 3,6 \cdot \frac{m_c}{t_c} \quad (5)$$

$$\text{CEC} = \frac{1000 \cdot Gh}{Ne} \quad (6)$$

Donde: Ne: potencia efectiva. kW; m_c: masa de combustible, kg; y t: tiempo, h.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización del aceite de *Jatropha curcas* L utilizado

En la Tabla 2 se observa que el aceite de *Jatropha curcas* L está constituido principalmente de triglicéridos con radicales de ácidos oleico, linoleico y palmítico, y presenta una acidez relativamente baja, superior a la recomendada para la transesterificación básica que es de 1 mg KOH/g¹². La alta acidez provoca que la reacción de saponificación se favorezca y durante el proceso se formen emulsiones y jabones, disminuyendo el rendimiento de la reacción y tornando más lentas las etapas de separación, recuperación y purificación de los productos. Por tal motivo se realizó un pre-tratamiento al aceite para reducir la acidez. Para este pre-tratamiento, se trató el aceite con una disolución de hidróxido de sodio, calentando la muestra y agitando cuidadosamente de manera que no se emulsione y se separó por métodos mecánicos el jaboncillo que se produce debido a la reacción secundaria de saponificación.

3.2 Caracterización del biodiesel obtenido

El biodiesel obtenido a partir de aceite de *Jatropha curcas* L cumple con las especificaciones de calidad establecidas por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (Resolución ANP No. 42/2004)¹³ (Tabla 3). Esta es la norma de Brasil que Cuba utiliza provisionalmente hasta que se tenga una norma cubana.

3.4 Resultados de los experimentos en la etapa de transesterificación

Para todos los experimentos el tiempo de decantación de la fase rica en glicerina en la etapa de decantación fue de 24 horas. Las Tablas 4 y 5 muestran el resultado de las variables respuesta para cada una de las condiciones experimentales estudiadas. De ellas se puede observar que al utilizar hidróxido de potasio no

Tabla 2. Propiedades físico-químicas del aceite de *Jatropha curcas* L

Propiedades físico-químicas	Norma	Aceite J. curcas
Ácidos grasos libres (mg KOH/g)	ASTMD- 664	1,63
Densidad a 20°C (kg/m ³)	ASTMD- 1298	914,9
Índice de refracción a 25°C	ASTMD- 1218	1,4670
Índice de saponificación	ASTMD- 94	165,0
Índice de yodo	EN 14111	95,0
Insaponificables, %	ASTMD- 1065	1,00
Índice de peróxido	ISO 3960	9,98
Punto de solidificación, °C	D-97	<- 10,0
Color ASTM	ASTMD- 1500	1,00
Cenizas %	ABNT NBR 9842	<- 0,1
Poder calórico superior, kJ/kg		41,2
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	ASTMD- 445	31,5
Composición en radicales grasos	EN 14103	
C16:0 Ácido palmítico		16,01
C18:0 Ácido esteárico		6,9
C18:1 Ácido oleico		40,1
C18:2 Ácido linoleico		35,4
C18:3 Ácido linolénico		0,3

se alcanzan las especificaciones para el contenido de glicerina que se presentan en la Tabla 4 (máx. 0,38%) con excepción del experimento 7, aunque con un valor muy cerca del máximo permisible. Mientras, al utilizar metóxido de sodio, es mayor el número de condiciones experimentales que cumplen la especificación (3, 7, 8, 9, 10, 11) encontrando los menores valores para las condiciones en que las variables se encuentran en sus puntos medios. Este resultado constata lo ya conocido, que la presencia de glicerina en el biodiesel es pernicioso para el motor. Este resultado se corresponde con lo planteado por Demirbas¹⁴ que declara que los metóxidos son más eficaces que los hidróxidos correspondientes, pero son un poco más caros.

Tabla 3. Especificaciones de biodiesel

Propiedades	Norma	Especificaciones	Biodiesel
Rendimiento de la reacción mín. (%)		92	99,38
Densidad a 20°C (kg/m ³)	ASTM D- 1298	860-900	897
Agua y sedimento, máx. (%v/v)	ASTM D- 2709	0,05	0,0001
Punto de inflamación, mín. (°C)	ASTM D- 93	100,00	189
Residuo de carbono, (micro) (% m/m)	ASTM D4530-11	0,1	0,01
Cenizas sulfatadas máx. (% m/m)	ASTM D- 874	0,02	0,014
Azufre total máx. (% m/m)	ASTM D- 5453	0,05	0,01
Sodio +potasio máx. mg/kg	EN 14108	10,00	1,2
Corrosividad al cobre, 3 h a 50 °C, máx.	ASTM D-130	1,00	1,00
Número de ácido (mg KOH/g)	ASTM D974-12	0,8	0,25
Glicerina total, máx. (% m/m)	EN 14105	0,38	0,1657
Mono glicéridos, máx. (% m/m)	EN 14105	1,00	0,53
Diglicéridos, máx. (% m/m)	EN 14105	0,25	0,1710
Triglicéridos, máx. (% m/m)	EN 14105	0,25	0,0020
Estabilidad a la oxidación a 110 °C, mín. (h)	ASTM 2274	6,00	6,25

Tabla 4. Transesterificación del aceite de *Jatropha curcas* L. con metanol, utilizando hidróxido de potasio como catalizador

No.	X1	X2	X3	Rendimiento (%)	Acidez (%)	Ésteres (%)	Glicerina total (%)	Xa	Viscosidad a 40°C (mm ² /s)
1	-1	-1	-1	95,80	0,15	87,05	1,37	86,95	5,4847
2	+1	-1	-1	92,32	0,20	85,46	1,63	84,48	5,4418
3	-1	+1	-1	91,86	0,10	97,62	0,69	93,43	4,7367
4	+1	+1	-1	99,80	0,10	96,08	0,82	92,19	4,6749
5	-1	-1	+1	90,50	0,20	88,71	1,13	89,24	5,0015
6	+1	-1	+1	94,84	0,15	95,33	0,90	91,43	4,8574
7	-1	+1	+1	95,40	0,20	99,19	0,37	96,48	4,5761
8	+1	+1	+1	94,28	0,10	88,44	0,62	94,10	4,6394
9	0	0	0	97,86	0,10	91,47	0,68	93,52	4,8242
10	0	0	0	97,51	0,15	90,05	0,68	93,52	4,8606
11	0	0	0	97,10	0,10	91,88	0,67	93,62	4,8021

Tabla 5. Transesterificación de aceite de *Jatropha curcas* L. con metanol, utilizando metóxido de sodio como catalizador

No.	X1	X2	X3	Rendimiento (%)	Acidez (%)	Ésteres (%)	Glicerina total (%)	Xa	Viscosidad a 40°C (mm ² /s)
1	-1	-1	-1	96,77	0,18	91,96	0,95	90,95	4,8037
2	+1	-1	-1	94,26	0,20	98,04	0,67	93,62	4,6756
3	-1	+1	-1	93,72	0,20	99,05	0,35	96,67	3,9654
4	+1	+1	-1	99,91	0,20	98,40	0,60	94,29	4,1180
5	-1	-1	+1	92,67	0,20	98,59	0,45	95,71	4,5738
6	+1	-1	+1	96,93	0,20	98,88	0,99	90,57	4,7005
7	-1	+1	+1	97,34	0,20	99,32	0,28	97,33	4,0721
8	+1	+1	+1	96,39	0,10	99,18	0,30	97,14	4,1509
9	0	0	0	98,68	0,20	98,21	0,25	97,62	4,1212
10	0	0	0	98,12	0,20	98,71	0,23	97,81	4,2518
11	0	0	0	98,13	0,20	98,88	0,26	97,52	4,0986

Por otra parte, si se comparan los valores de viscosidad cinemática para ambos catalizadores se aprecia que para el de catalizador metóxido de sodio, es menor, siendo la diferencia estadísticamente significativa para 95% de confianza. El valor de viscosidad cinemática no aparece como una especificación.

Utilizando el programa Statgraphics Centurion XV se realizó el análisis de superficie de respuesta correspondiente al diseño de experimentos de las Tablas 4 y 5. En la Tabla 6 se presentan los modelos obtenidos en función de las variables significativas, para un 95% de confianza. Para las variables rendimiento (%), ésteres (%) y acidez (%) no se encontró dependencia estadísticamente significativa con las variables independientes X1, X2 y X3 en el intervalo estudiado.

Tabla 6. Modelos para correlacionar las variables de respuesta y las variables independientes

Variable respuesta	Modelo	Error medio absoluto
<i>Catalizador hidróxido de potasio</i>		
Conversión %	91,72 + 6,025 X2 + 3,55 X3	1,257
Glicerina total %	0,8691 - 0,6325 X2 - 0,3725 X3	0,1322
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	4,9 - 0,5397 X2 - 0,3163 X3 + 0,2177 X2*X3	0,04875
<i>Catalizador metóxido de sodio</i>		
Conversión %	95,38 + 3,645 X2	1,659
Glicerina total %	0,4845 - 0,3825 X2	0,1743
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	4,321 - 0,612 X2	0,1081

De la interpretación de estos modelos se puede concluir que en el intervalo estudiado, la variable tiempo de reacción (X1) no es significativa. De igual forma la variable que más influencia tiene en las propiedades evaluadas es la concentración de catalizador (X2). La influencia de la variable razón molar metanol/aceite (X3) solamente es significativa para el proceso en que se utiliza el hidróxido de potasio como catalizador.

A partir de estos modelos se realizó la optimización múltiple para encontrar las condiciones de experimentación con las que se obtiene un mayor valor de la función "deseabilidad", criterio utilizado por el programa Statgraphics Centurion XV. En la Tabla 7 se presentan las condiciones óptimas sugeridas.

Tabla 7. Selección de las mejores condiciones experimentales

Condiciones	Hidróxido de potasio	Metóxido de sodio
X1	-1	-1
X2	1	1
X3	1	-1
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	4,581	4,0
Xa	96,51	97,21
Glicerina total (%)	0,37	0,29

Freedman y colaboradores¹⁵ estudiaron el efecto de la relación molar (variando de 1:1 hasta 6:1) en la conversión del éster con aceites vegetales. Los aceites de soya, girasol y algodón presentaron comportamientos similares y obtuvieron altas conversiones (93-98%)

con una relación molar de 6:1. La transesterificación de aceite de algodón con metanol, fue estudiada por Nezihe, manteniendo la relación molar alcohol/aceite en 6:1 y encontró que a 60°C y 1,5% de catalizador, la producción de biodiesel fue máxima con un valor de 92,7%¹². Antolín y colaboradores¹⁶ presentan 9:1 como relación molar alcohol/aceite óptima para la transesterificación metílica de aceite de girasol. Utilizaron temperaturas de 60°C y 70°C. Para la producción de biodiesel a partir de aceite de maní, una proporción molar inicial etanol/aceite de 6:1 se consideró la más adecuada. Por consiguiente los resultados alcanzados no se contradicen con los reportados por otros.

En relación con el uso del metóxido de sodio como catalizador, las grandes plantas en Europa y EE.UU lo usan para producir el biodiesel por transesterificación metílica del aceite de girasol usando NaOH como catalizador encontrando determinante la concentración de 1,3% (máscico) respecto a la masa inicial de aceite para las temperaturas entre 20-50°C. La optimización de la metanólisis del aceite de girasol en términos de cantidad de catalizador, también fue estudiada por Antolín y colaboradores¹⁶ usando el hidróxido de potasio. Las mejores conversiones se obtuvieron con una proporción 0,28% (máscico) respecto a la masa inicial de aceite.

Martínez y colaboradores¹⁷ optimizaron la producción de biodiesel a partir de aceite de girasol por transesterificación usando Na₂O soportado en zeolita y metanol. Los mayores contenidos de éster metílico (99,3%) se obtuvieron a 60°C, relación molar etanol/aceite y concentración de catalizador 10% (máscico) con un contenido de Na de 10%.

Ya para la transesterificación de aceite comestible usado, el uso de KOH presentó buenos resultados respecto al catalizador NaOH, siendo 1,0% (máscico) la mejor concentración respecto a la masa inicial de aceite¹⁸. Estos valores se corresponden con los obtenidos en el presente trabajo (0,80%).

Del análisis de los resultados y la comparación con la literatura se puede concluir que se debe trabajar a concentraciones de catalizador de 0,80% (máscico), con un tiempo de reacción mínimo de 30 minutos y una razón molar metanol/aceite en dependencia del catalizador utilizado, pero en el intervalo entre 6:1 para el metóxido de sodio y 9:1 para el hidróxido de potasio. Estas condiciones garantizan una alta conversión (superior al 96,0%) y un bajo porcentaje de glicerina (inferior a 0,38%).

3.5 Prueba de motores

Durante los ensayos, las condiciones medioambientales fueron: temperatura ambiente 24 °C, presión atmosférica 1001 hPa y humedad relativa de 78,0 %.

Las pruebas del motor se realizaron con combustible diesel regular y biodiesel puro (B100). En la Tabla 8 se muestran los resultados del consumo específico de combustible obtenido para ambos. Se observa que los valores para el combustible diesel resultaron menores. Esto es debido al menor poder calórico del biodiesel¹⁴ de *Jatropha curcas L.*

Tabla 8. Consumo específico de combustible

n (rpm)	Ne (kW)	Combustible diesel		Biodiesel <i>Jatropha curcas L</i>	
		Gh (kg/h)	CEC (g/kW·h)	Gh (kg/h)	CEC (g/kW·h)
1300	2,72	0,96	353	1,38	507
1500	3,14	0,90	287	1,26	401
1700	3,56	1,14	320	1,5	422

En la Figura 1 se puede apreciar que se obtuvo una menor temperatura en los gases de escape al utilizar el biodiesel puro dado el menor poder calórico unido al tiempo de retardo de la ignición. La temperatura máxima de las emisiones de gases de escape fue 462°C cuando se utilizó el biodiesel de *Jatropha curcas L.*, mientras para el diesel fue 549°C.

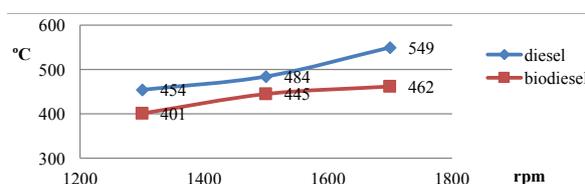


Figura 1. Temperaturas de los gases de escape

4. CONCLUSIONES

Para el intervalo estudiado las mejores condiciones para realizar la reacción de transesterificación del aceite de *Jatropha curcas L.*, para los dos catalizadores (hidróxido de potasio y metóxido de sodio) son: concentración de catalizador 0,8% (máscico), tiempo de reacción 30 minutos y razón molar etanol/aceite entre 9:1 si se utiliza hidróxido de sodio, pudiendo ser menor la razón molar si se trabaja con metóxido de sodio.

El biodiesel obtenido bajo estas condiciones cumple con las especificaciones internacionales, con conversiones altas de más del 96% y el consumo específico del biodiesel de *Jatropha curcas L.* es mayor que el de diesel regular en un 46,30%, debido a su menor poder calórico.

Las temperaturas de los gases de escape del biodiesel son menores que las que se reportan para el diesel regular. La temperatura máxima del gas de la descarga fue 462 °C con el biodiesel de *Jatropha curcas L.* y 549°C con el diesel.

REFERENCIAS

- Escobar, A.; Luna, C.; Luna, D.; Marcos, A.; Casanovas, D.; Mellado, E. Selection and Characterization of Biofuel-Producing Environmental Bacteria Isolated from Vegetable Oil-Rich Wastes. *PLOS ONE*. **2014**, *9*,1-12
- Machado, R.; Suárez, J. Performance of three provenances of *Jatropha curcas* in the germplasm bank of the EEPF "Indio Hatuey". *Pastos y Forrajes*. **2009**, *32*, 29-37.

3. Martin, C.; Moure, A.; Martin, G.; Carrillo, E.; Dominguez, H.; Parajo, J. C. Fractional characterisation of *Jatropha*, neem, moringa, trisperma, castor and candlenut seeds as potential feedstocks for biodiesel production in Cuba. *Biomass Bioenergy*. **2010**, *34*, 533-538.
4. Melo E.; Sánchez Y.; Piloto R. El escenario energético cubano y los combustibles alternativos. Experiencias, potencialidades y perspectivas futuras., in Experiencias del proyecto célula de conocimientos en el uso de biocombustibles en MCI, IDICT, Editores: Rodríguez Y. y Herrera D., La Habana. **2014**. ISBN: 978-959-234-095-4.
5. Melo, E.A., Piloto R., Tobío I., Goyos L., Verhelst S. et al. Performance of a single cylinder diesel engine fuelled with emulsified residual oleins and standard diesel fuel. *RE&PQJ*. **2014**, *1*,183-188.
6. Agarwal A.K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2007**, *33*, 233-271.
7. Lapuerta, M.; Rodríguez, J.; Ramos, A.; Alvarez, B. Effect of the test temperature and anti-oxidant addition on the oxidation stability of commercial biodiesel fuels. *Fuel*. **2012**,*93*,391-396.
8. Melo, E.A.; Piloto R.; Goyos L.; Sierens R.; Verhelst S. Emulsification of animal fats and vegetable oils for their use as a diesel engine fuel: An overview. *Renew. Sust. Energy. Rev.* **2015**, *47*, 623-633.
9. Piloto R.; Goyos L.; Milagros M.A.; Caro R.; Galle J.; Sierens R.; Verhelst S. Characterization of *Jatropha curcas* oils and their derived fatty acid ethyl esters obtained from two different plantations in Cuba. *Biomass Bioenergy*. **2011**, *35*, 4092-4098.
10. Sotolongo J.A.; Díaz, A.A.; Montes de Oca, S.; del Valle, Y.; García S.A. Potencialidades energéticas y medio ambientales del árbol *Jatropha curcas* L en las condiciones edafoclimáticas de la región semiárida de la provincia de Guantánamo. *Tecnología Química*. **2007**, *27*, 76-82.
11. Melo E.; Sánchez Y.; Ferrer N. Evaluación de un motor de encendido por chispa trabajando con mezclas etanol- gasolina. *Ingeniería Energética*. **2012**, *33*, 94-102.
12. Salgueiro, J. L.; Pérez, L.; Cancela, A. Simulación y diseño de una planta versátil para la obtención de biodiesel. Ed Meubook, S.L. España. 2014. ISBN: 978-84-943003-1-8.
13. Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles. Resolución ANP No. 42/2004. Brasil. **2004**.
14. Mohammed A.; Mustafa A. Performance and emission characteristics of a diesel engine using *Jatropha* oil – diesel blends. *International Journal of Energy Science and Engineering*. **2016**, *2*, 1-7.
15. Freedman B.; Butterfield R.O.; Pryde E.H. Transesterification kinetics of soybean oil. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **1986**, *63*, 1375-1380.
16. Antolin G.; Tinaut F.V.; Briceño Y.; Castaño V.; Pérez C.; Ramírez A.I. Optimization of biodiesel production by sunflower oil transesterification. *Bioresour. Technol.* **2002**, *83*,111-114.
17. Martínez, S.; Romero, R.; Natividad, R.; González, J. Optimization of biodiesel production from sunflower oil by transesterification using Na₂O/NaX and methanol. *Catal. Today*. **2014**, *220-222*, 12-20.
18. Tomasevic A.V., Siler M, Covic S.S. Methanolysis of used frying oil. *Fuel Process. Technol.* **2003**, *81*,1-6.