

Artículo científico

Evaluación de mezclas de biodiésel de *Jatropha curcas* (L.) en bancos de motores diésel

Evaluation of mixtures of *Jatropha curcas* (L.) biodiesel in diesel engine banks

Indira Tobío-Pérez¹, Eliezer Ahmed Melo-Espinosa¹, Jesús Suárez-Hernández², José Ángel Sotolongo-Pérez³ y Ramón Piloto-Rodríguez¹

¹ Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, Universidad Tecnológica de La Habana, Calle 114 No. 11901 e/119 y 127, Marianao 15, Ciudad de la Habana, Cuba

² Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey, Universidad de Matanzas, Ministerio de Educación Superior Central España Republicana, CP 44280, Matanzas, Cuba

³ Grupo Empresarial LABIOFAM, sucursal Guantánamo - Ministerio de la Agricultura, Cuba
Correo electrónico: rpiloto@ceter.cujae.edu.cu

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar diferentes mezclas del biodiésel extraído de *Jatropha curcas* (L.) en bancos de motores diésel, para su posterior uso en el transporte agrícola en Cuba. Para ello, se prepararon mezclas del combustible diésel con 5, 10, 15 y 20 % de este biocombustible. Se evaluaron las prestaciones en motores, las emisiones de gases contaminantes y los parámetros de la combustión; asimismo, se definió hasta qué contenido de biodiésel se puede llegar en la mezcla combustible. Entre los resultados más importantes, se evidenció un incremento en el consumo específico de combustible a medida que se aumentó el porcentaje de biodiésel en la mezcla y la presión en la cámara de combustión; así como una disminución del tiempo de retardo de la ignición, debido al mayor número de cetano del biodiésel comparado con el diésel. En el caso del sistema de inyección de combustible, se registró un aumento de la presión de inyección al emplear biodiésel. Se evidenció una reducción de las emisiones de CO, NOx y CO₂ cuando se mezcló hasta el 20 %, por lo que se considera que este es un porcentaje adecuado, aunque es necesario realizar las pruebas de durabilidad del motor.

Palabras clave: combustión, contaminantes, densidad, viscosidad.

Abstract

The objective of this study was to evaluate different mixtures of the biodiesel extracted from *Jatropha curcas* in diesel engine benches, for their later use in agricultural transportation in Cuba. For such purpose, mixtures of diesel fuel were prepared with 5, 10, 15 and 20 % of this biofuel. The engines' performance, emissions of pollutant gases and combustion parameters were evaluated; likewise, the level of biodiesel content that can be included in the fuel mixture was defined. Among the most important results, an increase in the specific consumption of fuel was shown as the biodiesel percentage in the mixture and the pressure in the combustion chamber increased; as well as a decrease of the ignition delay time, due to the higher cetane number of the biodiesel compared with diesel. In the case of the fuel injection system, an increase of the injection pressure was recorded when using biodiesel. A reduction was shown of CO, NOx and CO₂ emissions when up to 20 % was mixed, for which it is considered to be an adequate percentage, although it is necessary to conduct engine durability tests.

Keywords: combustion, pollutants, density, viscosity

Introducción

En la actualidad, el empleo de fuentes renovables de energía es un asunto de seguridad nacional para cualquier país. Entre las razones fundamentales para su uso se encuentra el acelerado consumo de combustibles fósiles a un ritmo exponencial, unido a los niveles de carga contaminante, fundamentalmente de gases de efecto invernadero (GEI), que genera la combustión propia del transporte auto-

motor (Li *et al.*, 2015; Ribas *et al.*, 2016). Para el sector de la transportación, una de las variantes más efectivas es el uso de combustibles alternativos, sobre todo aquellos derivados de los aceites vegetales, como el biodiésel (Nitiëma-Yefanova *et al.*, 2017). Este último tiene como ventajas que es un combustible similar al diésel, es biodegradable, y presenta relativamente alto contenido calorífico y elevada densidad energética (Tüccar *et al.*, 2014).

Asimismo, cuando los pequeños agricultores emplean la tierra para producir biocombustibles, tienen una oportunidad para obtener ganancias y garantizar seguridad a largo plazo para el mercado de sus cosechas. La forma más adecuada para la industria de los biocombustibles es la de realizar su producción y consumo en áreas rurales y no a una escala mayor. Las plantaciones de *Jatropha curcas* (L.) ofrecen la posibilidad de la siembra intercalada de cultivos, por lo que el área empleada puede utilizarse para la producción de alimentos, con beneficios mutuos, como se aprecia en la experiencia del proyecto BIOMAS-CUBA¹.

Por otra parte, las propiedades físico-químicas del biodiésel dependen de un número importante de indicadores del proceso de combustión y de las prestaciones del motor, debido fundamentalmente a los rangos de variación en la composición de los ácidos grasos que se pueden encontrar, incluso, entre diferentes variedades genéticas de *J. curcas* (Piloto-Rodríguez *et al.*, 2012).

El biodiésel B100 podría ser empleado directamente en un motor diésel, ya sea con o sin mezcla de combustible diésel. No obstante, su generalización en el mundo ha estado marcada por el empleo de ambos combustibles, con 20-30 % de biodiésel en la mezcla (Xu *et al.*, 2017), aun cuando se reportan investigaciones con un porcentaje mayor (Bhuiya *et al.*, 2016; Dharma *et al.*, 2017). Ello se debe a que con B100 se pueden presentar problemas en los motores, como tupiciones en los sistemas de inyección y en los filtros; también se reporta el uso de mezclas del aceite con el diésel (Deshmukh y Patil, 2017).

En Cuba se cuenta con conocimiento y experiencia de más de 10 años acerca del uso de los aceites vegetales y sus mezclas combustibles, y de su efecto en la disminución de la emisión de los GEI cuando estos aceites son empleados en el transporte automotor, y también se valoran como una fuente alternativa de energía renovable y de sustitución de importaciones (Toral *et al.*, 2008).

Por todo lo expuesto, el objetivo de este estudio fue evaluar diferentes mezclas del biodiésel extraído de *J. curcas* en bancos de motores diésel, para su posterior uso en el transporte agrícola local.

Materiales y Métodos

El biodiésel de *J. curcas* se extrajo a partir de una plantación procedente de Guantánamo –Cuba–,

para lo cual se utilizaron las semillas cosechadas en una producción; también se determinó la viscosidad y la densidad del biodiésel de la planta (B100) y del combustible diésel de referencia que es utilizado en los bancos y en las mezclas.

Caracterización fisicoquímica del biodiésel.

Para la determinación de la densidad se utilizó un picnómetro estándar de 25 mL y una balanza analítica Kern con una precisión de 0,00001 g. En el caso de la viscosidad dinámica, se usó un viscosímetro Rion VT 03-F; la temperatura de 40 °C y la agitación adecuada para la formación homogénea de la mezcla se garantizaron mediante un agitador magnético IKA RCT basic.

Pruebas en bancos de motores diésel. Para las pruebas se utilizaron dos instalaciones. La primera estuvo compuesta por un motor monocilíndrico que analizó el comportamiento de los combustibles en la cámara de combustión. Se realizaron experimentos con combustible diésel y con biodiésel puro (B100), con el objetivo de constatar cambios en la combustión relativos a los dos extremos de combustibles (ambos componentes de cada mezcla). Se utilizó un motor diésel Lister-Petter de inyección directa, con las siguientes características técnicas principales: un cilindro, con 0,659 L de cilindrada, relación de compresión 16,5:1 y enfriado por agua. Las pruebas se realizaron en régimen estacionario, o sea, cuando el estado térmico, el régimen de velocidad y la carga del motor no variaron con el tiempo. Para medir la presión en la cámara de combustión, el motor tuvo instalado en el cilindro un sensor piezoeléctrico Kistler (tipo 6067C).

Estas pruebas se hicieron en noviembre de 2017, y las condiciones ambientales experimentales de referencia fueron las siguientes: la temperatura ambiente se mantuvo entre 28 y 30 °C, la presión atmosférica entre 1 001 y 1 004 hPa, y la humedad relativa alrededor del 70 %.

Para el análisis de los gases de escape se empleó un analizador de gases Testo 350x. Los experimentos en el motor monocilíndrico se desarrollaron a 78 Nm de carga, y variaron la frecuencia de rotación entre 1 300 y 1 700 rpm.

El segundo motor empleado fue un Lister-Petter de dos cilindros, el cual estaba formado por una unión motor-generador eléctrico. El electrógeno dispone de una central de control en un

¹ BIOMAS-CUBA: Proyecto Internacional liderado por la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey, financiado por la Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo (COSUDE).

armario metálico con cableado flexible. El conjunto motor-generador estuvo fijo a la base mediante amortiguadores antivibratorios. Las principales características del par motor-generador fueron: dos cilindros, inyección directa y 1 800 rpm de frecuencia de rotación. Esta instalación dispuso de casi todas las posibilidades que brinda la instalación del motor monocilíndrico, excepto las mediciones en la cámara de combustión.

Se instaló una balanza digital Sartorius modelo EA6DCE-1, con una precisión de $\pm 0,2$ g, con el objetivo de determinar el gasto de combustible horario. La medición de este indicador se realizó mediante el método gravimétrico, por el cual se determinó la masa de combustible consumida o gastada para un tiempo de cinco minutos.

Los indicadores evaluados fueron el consumo específico de combustible (CEC) y las emisiones de gases contaminantes a diferentes valores de frecuencia de rotación del motor y de carga. La carga del motor se fijó y determinó indirectamente a través del acoplamiento a un banco de resistencias variables que existe en la instalación.

En este motor se probaron cuatro mezclas con 5, 10, 15 y 20 % de biocombustible (B5, B10, B15 y B20, respectivamente), así como el combustible diésel de referencia nuevamente. Estos experimentos se realizaron con una carga constante de 1 800 rpm, una frecuencia media para este motor y habitual en motores diésel, y se trabajó a cuatro cargas. Todas las pruebas se hicieron en un mismo día, a una temperatura exterior de 21 °C, 70 % de humedad relativa y 1 016 hPa.

En el caso del análisis de las prestaciones del motor, así como las mediciones en la cámara de combustión, estos se desarrollaron a partir del completamiento de ciclos de trabajo del motor; y, por tanto, correspondieron a un gran número de datos experimentales, pues un ciclo ocurre en milisegundos y los experimentos en banco para cada combustible duran varios minutos. Ello hizo que los resultados se analizaran a partir de la determinación de los valores medios, tanto de prestaciones como de emisiones, y mediante la desviación estándar se determinó el 5 % de incertidumbre. Todos

los análisis estadísticos se realizaron para un 95 % de intervalo de confianza.

El número de cetano se determinó a partir del perfil de ácidos grasos del aceite de *J. curcas*, del cual procede el biodiésel (Piloto-Rodríguez *et al.*, 2013).

Resultados y Discusión

Los resultados de la densidad y viscosidad de los combustibles se muestran en la tabla 1. Las normas para el biodiésel (ASTM D6751 y EN 14214) plantean que la viscosidad dinámica debe estar por debajo de 6 mPa-s, mientras que la densidad del biocombustible, entre 860 y 900 kg/m³.

En este caso, el biodiésel estuvo dentro del rango establecido de densidad y viscosidad dinámica por ambas normas. Según los valores de viscosidad dinámica y de densidad para biodiésel (tabla 1), el analizado también se encontraba en el rango de viscosidad cinemática que establece la norma ASTM D 6751-07, por debajo del límite máximo establecido de 6 mm²/s. Sin embargo, en estudios realizados por Tiwari y Sahu (2013) se determinó una viscosidad de 4,8 mm²/s (8,1 mPa-s) con una densidad de 898,1 kg/m³ (Barua, 2011).

A partir de la composición de los ácidos grasos (tabla 2) se estimó el número de cetano del biodiésel extraído de *J. curcas*, el cual fue de 47,55, superior al valor establecido para el combustible diésel cubano (43). Según la norma para biodiésel ASTM D 6751-07, el valor mínimo permitido para el cetano es de 47, por lo que el biodiésel estuvo en el límite establecido.

Si en las pruebas en el motor monocilíndrico no hay diferencias significativas en el comportamiento de los dos combustibles que conforman las mezclas, no se deben esperar diferencias importantes cuando estas se preparen a determinado porcentaje y se lleven al motor, ya que cualquier mezcla debe mostrar niveles intermedios en los parámetros analizados en la cámara de combustión. La comparación del diagrama de presión en el cilindro para combustible diésel y B100 a 1 300 rpm y 78 Nm se muestra en la figura 1.

Tabla 1. Valores de viscosidad y densidad para los combustibles.

Combustible	Viscosidad dinámica η (mPa-s) a 40°C	Densidad (kg/m ³) a 15 °C
Diésel	4-5	850,5
Biodiésel de <i>J. curcas</i> (B100)	6	870,1

Tabla 2. Perfil de ácidos grasos del aceite de *J. curcas*.

Ácido graso	%
Palmítico (16:0)	13
Palmitoleico (16:1)	0,5
Esteárico (18:0)	5
Oleico (18:1)	38
Linoleico (18:2)	26
Linolenico (18:3)	10
Mirístico (14:0)	0,1

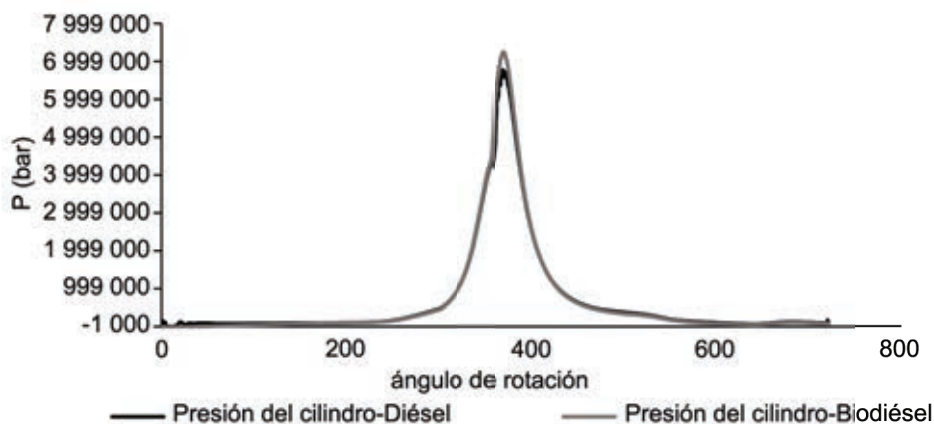


Figura 1. Presión en el interior del cilindro para diésel y B100 a 1 300 rpm y 78 Nm.

Existió un ligero aumento en la presión máxima en la cámara de combustión cuando se empleó B100; por ello, cualquier mezcla intermedia debe experimentar un máximo en la presión en un valor de presión intermedio y, por tanto, aún más cercano al del combustible diésel que es el de referencia, pero por encima de este. Un comportamiento similar en la presión máxima en la cámara de combustión se reportó para el biodiésel de *J. curcas* por Sahoo *et al.* (2009), con un aumento de 7,6 % a bajas y medias cargas del motor al emplear B100.

El incremento ligero de presión en el cilindro al utilizar biodiésel podría deberse a una mayor velocidad del proceso de combustión y a un ligero incremento en su eficiencia. Normalmente para el biodiésel ocurre un comportamiento opuesto, con una ligera disminución de la presión en el cilindro (Agarwal *et al.*, 2003). No obstante, esto depende del motor, las condiciones de trabajo y el número de cetano del combustible, y puede cambiar totalmente el comportamiento con la carga del motor.

En la figura 2 se muestra el diagrama de primera derivada de presión contra ángulos de giro

de cigüeñal; hubo un comienzo de la combustión ligeramente anterior para el biodiésel extraído de *J. curcas* (B100) a 1 300 rpm y 78 Nm. Este cambio no es numéricamente alto, pues está en el orden de los 3°, pero ello es suficiente para que ejerza influencia en las prestaciones del motor, en las emisiones y en el calor liberado. El incremento de la presión en el cilindro podría estar influenciado por comenzar antes la combustión; ello es un fenómeno típico del biodiésel, ya que este tiene un número de cetano superior al diésel y, por tanto, se acorta el tiempo de retardo de la ignición (Shahabuddin *et al.*, 2013).

Para el caso de la presión de inyección (fig. 3), hubo un incremento sustancial cuando B100 se empleó en lugar del combustible diésel. Este resultado trae como consecuencia que, aunque las mezclas que se empleen estén por debajo de un 30 % –y ello descende y acerca más la presión de inyección a la del combustible diésel–, sea necesario realizar un estudio de la influencia del cambio de combustible en los sistemas de inyección, pues al generarse mayor presión de inyección que la normal para el

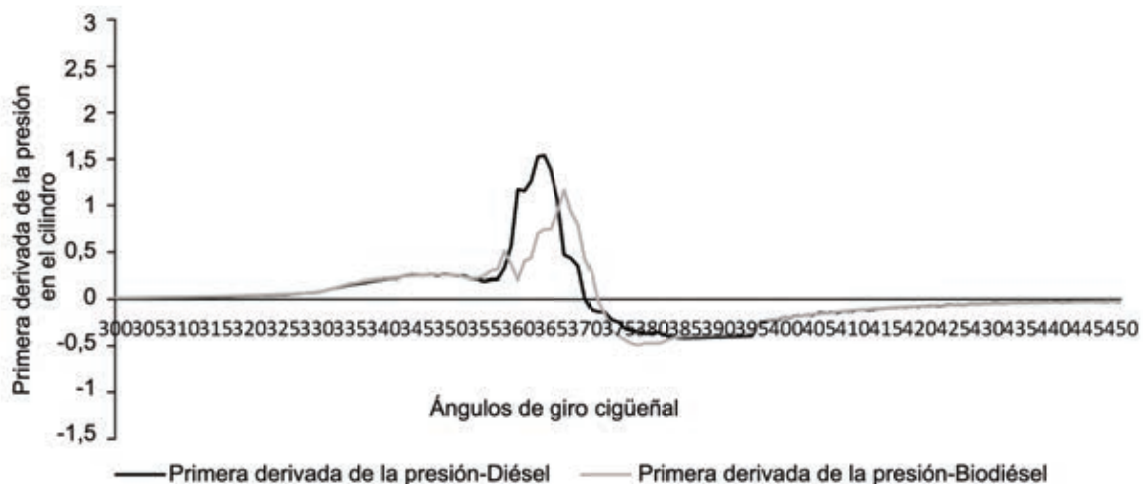


Figura 2. Diagrama de primera derivada de presión en la cámara de combustión a 1 300 rpm y 78 Nm.

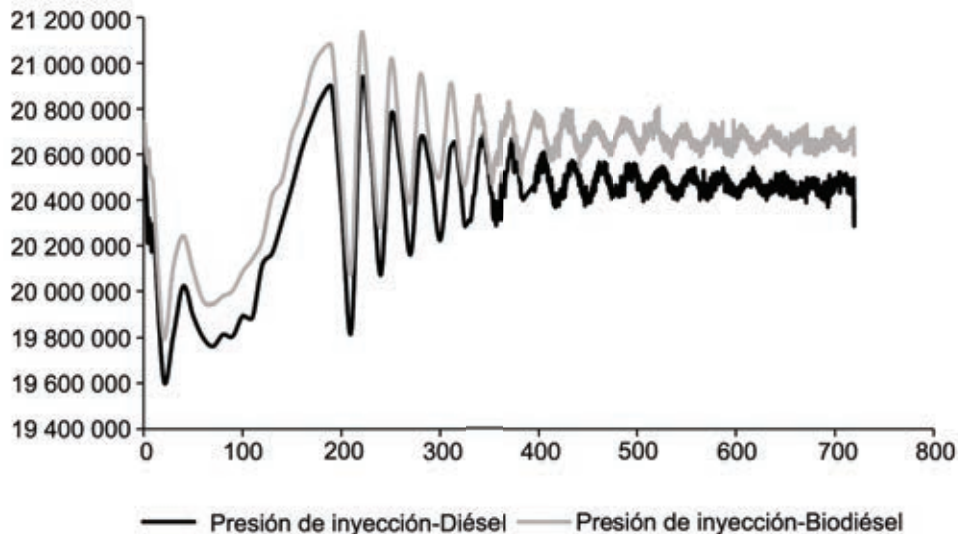


Figura 3. Presión de inyección de combustible a 1 300 rpm y 78 Nm.

inyector, puede que se reduzca en determinada medida su vida útil o disminuyan los tiempos requeridos para efectuar un mantenimiento.

En la literatura se reporta un aumento de la presión de inyección al utilizar biodiésel, con un incremento de hasta 100 bar por encima del diésel (Banapurmath *et al.*, 2008). Cuando se inyecta biodiésel, el aumento de presión creado por la bomba es mayor, debido a su menor compresibilidad y a una propagación más rápida del fluido a través del inyector, por la mayor velocidad desarrollada por el biodiésel. Adicionalmente, su mayor viscosidad reduce la posibilidad de fuga en el sistema de inyección, lo que genera una mayor presión (Lapuer-

ta *et al.*, 2008). Para el caso del biodiésel extraído de *J. curcas* a 1 500 rpm y 78 Nm, se observó un comportamiento similar que a 1 300 rpm cuando comienza la combustión; sin embargo, las diferencias fueron más acentuadas al utilizar combustible diésel (figs. 4, 5 y 6).

El comienzo de la combustión se apreció mucho antes que en el combustible diésel, fenómeno que no era tan evidente a 1 300 rpm (fig. 5). Ello explica, en parte, el hecho de que hubo una mayor presión máxima en la cámara de combustión cuando se empleó B100 con respecto al diésel, ya que al adelantarse la combustión se quemó más combustible en la zona de premezcla y debe esperarse también

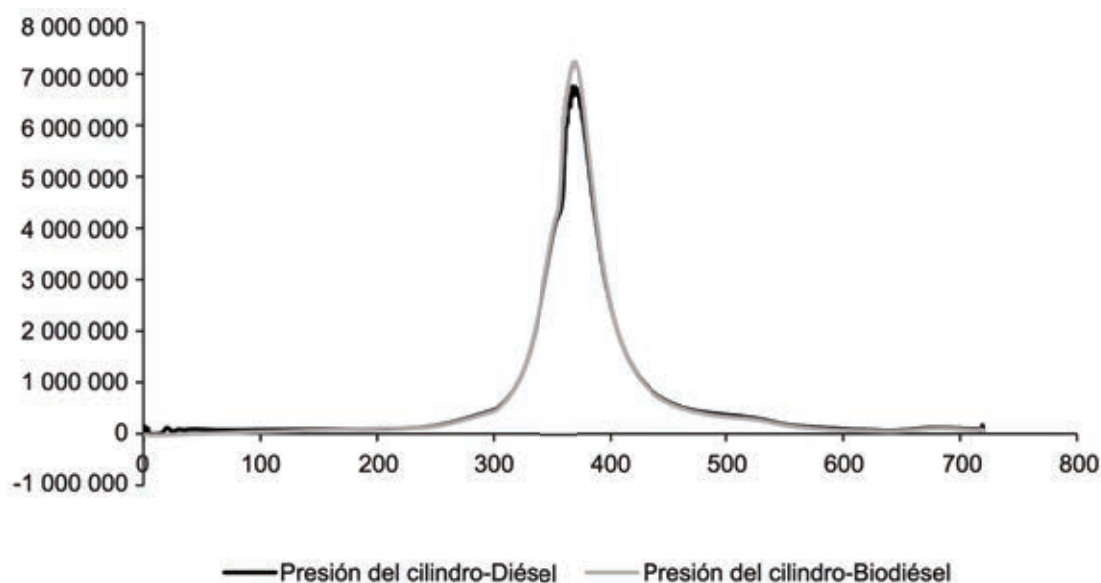


Figura 4. Presión en el interior del cilindro para diésel y B100 a 1 500 rpm y 78 Nm.

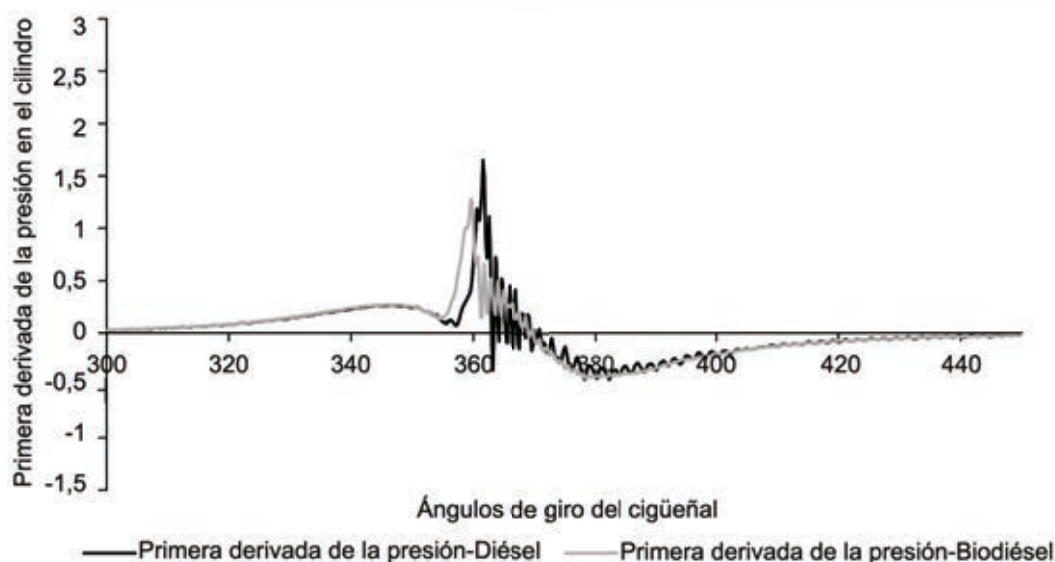


Figura 5. Diagrama de primera derivada de presión en la cámara de combustión a 1 500 rpm y 78 Nm

una mayor eficiencia de la combustión, lo cual no quiere decir que sea favorable para el motor.

Para el caso de B100 a 1 500 rpm y 78 Nm, se observó un comportamiento similar que a 1 300 rpm, cuando comenzó la combustión; sin embargo, las diferencias pueden ser más acentuadas al utilizar combustible diésel.

Las pruebas a 1 700 rpm y 78 Nm mostraron un comportamiento similar de los dos combustibles que a 1 500 rpm. A partir de estos resultados, queda claro que las mezclas que se lleven al motor con hasta 20 % de biodiésel tendrán el comportamien-

to descrito en este trabajo, intermedio en cuanto a todos los parámetros analizados (tomando los dos combustibles puros como extremos) y más cercano al del diésel.

Los resultados mostraron que el biodiésel extraído de *J. curcas* generó mayor presión en la inyección y en la cámara de combustión, y combus-tionó más rápido.

Las mezclas (B5, B10, B15 y B20) no tuvieron diferencias significativas en cuanto al consumo específico de combustible (fig. 7).

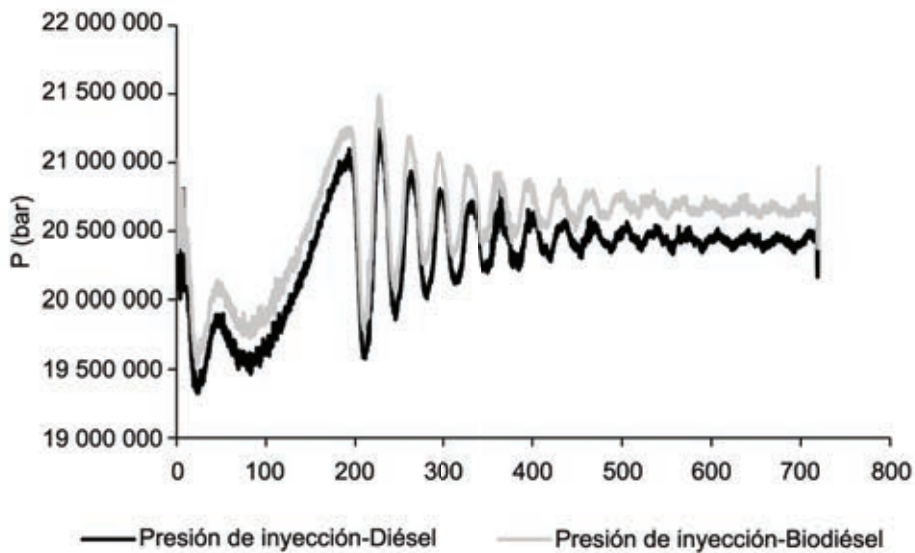


Figura 6. Presión en la inyección de combustible a 1 500 rpm y 78 Nm.

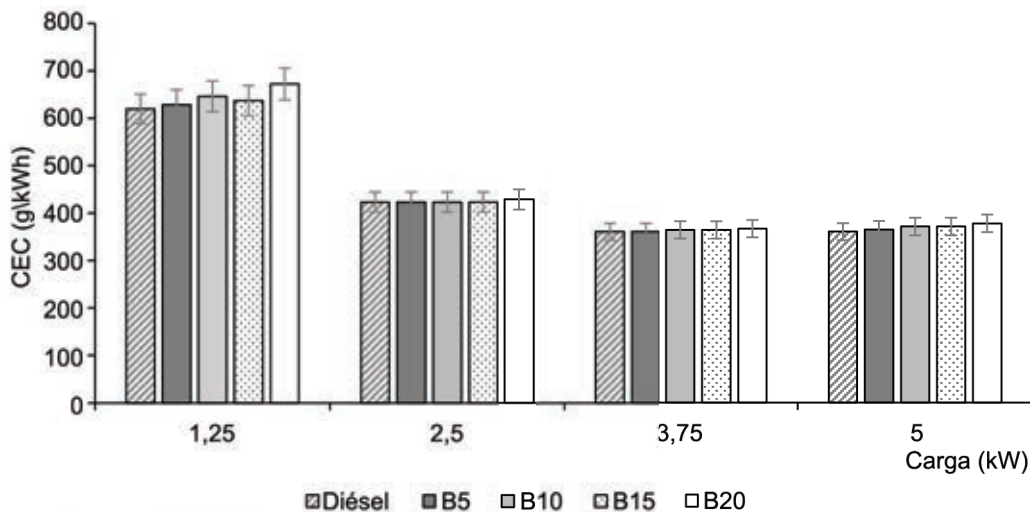


Figura 7. Comportamiento del consumo específico de combustible para mezclas a 1 800 rpm.

Las emisiones de óxido nítrico (NO_x) a diferentes cargas del motor se muestran en la figura 8; en todos los casos se evidenció una disminución de estas emisiones en las mezclas del biodiésel de *J. curcas* con respecto al diésel. En los casos de cargas extremas (baja o más alta) ocurrieron mayores cambios. Ese resultado es lógico, ya que a baja carga el motor se encuentra bastante libre y se consume menos combustible; mientras que a elevadas cargas hay una demanda mayor de combustible; y en este caso, al introducir más biodiésel en el sistema, hay una tendencia a reducir la temperatura en la cámara de combustión (Piloto-Rodríguez, 2014).

Las emisiones de NO_x en un motor están determinadas por la temperatura en la cámara de combustión, y se conoce por la literatura especializada que el biodiésel tiende a disminuir esta temperatura y, por ende, a reducir las emisiones de NO_x (Piloto-Rodríguez, 2014). Es necesario puntualizar que la utilización de biodiésel puede reducir las emisiones de NO_x y contribuir, de esta forma, a la reducción de las emisiones de GEI.

Al comparar con el combustible diésel, la mezcla que más hizo disminuir las emisiones fue B20, por lo que podría esperarse que con porcentajes superiores de biodiésel estas se reduzcan aún más;

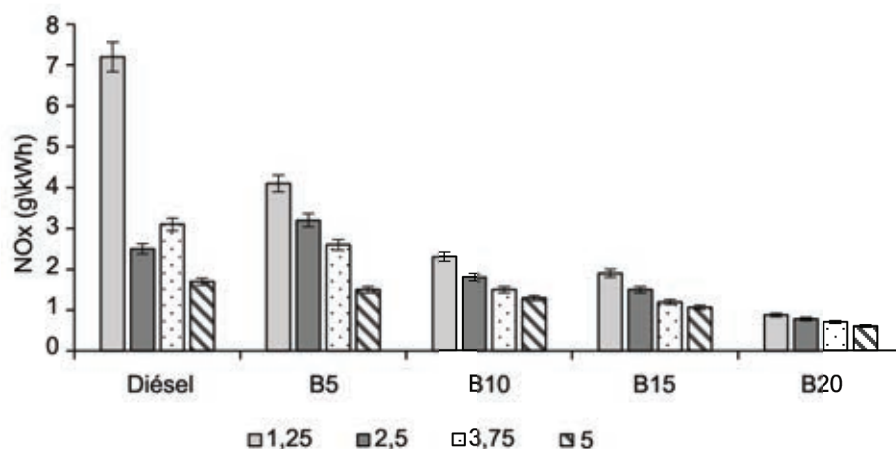


Figura 8. Emisiones de NOx a diferentes cargas del motor y 1 800 rpm.

sin embargo, habría que considerar otros factores, tales como: una menor eficiencia de la combustión, debido al incremento acentuado de la densidad y la viscosidad en la mezcla; y una reducción aún mayor del poder calórico, que llevaría a un aumento del CEC. No obstante, el elemento fundamental para no sobrepasar el 20 % estaría relacionado con la durabilidad del motor.

Los niveles de NOx estuvieron por debajo de 6 g/kWh, los cuales han sido reportados para este tipo de biodiésel, y por debajo de la norma Euro 4 (3,5 g/kWh), excepto cuando el motor trabajó a baja carga para combustible diésel y B5. El que la mezcla no supere al B20 es lo que internacionalmente se establece como el compromiso en la reducción de carga contaminante al ambiente con la menor afectación posible a la tecnología (Piloto-Rodríguez, 2014).

Los resultados de las emisiones de monóxido de carbono (CO) se muestran en la figura 9. La reducción en las emisiones de CO para las mezclas con biodiésel y, especialmente para el caso de B20, se producen por una combustión más eficiente en la cámara de combustión, debido al mayor número de cetano del biodiésel (Piloto-Rodríguez, 2014); si la combustión es eficiente debe ser más completa y, por ende, debe emitirse menos CO. Este resultado, unido a las reducciones de NOx, son consecuencias positivas de las mezclas analizadas. Lapuerta *et al.* (2008) también encontraron una reducción en las emisiones de CO cuando emplearon biodiésel. De ahí el efecto beneficioso de la utilización del biocombustible en los motores de combustible, como una alternativa para la disminución de GEI.

Otro resultado importante respecto a las emisiones lo fue la disminución de dióxido de carbono

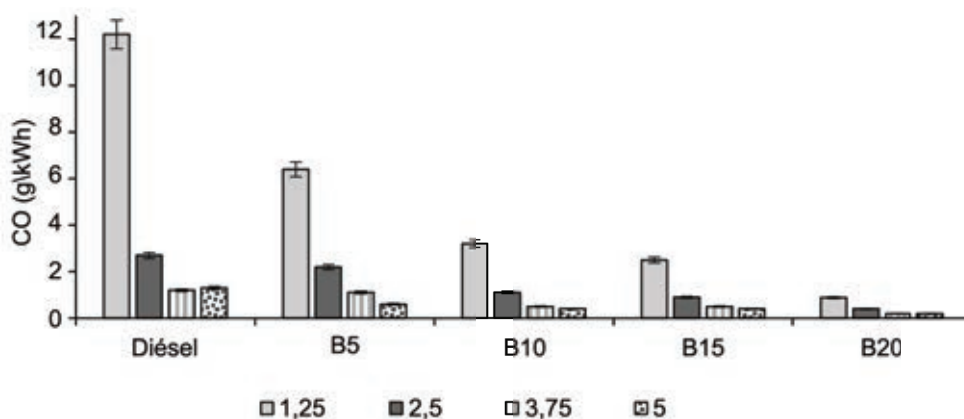


Figura 9. Emisiones de CO a 1 800 rpm y diferentes cargas.

(CO₂) con el porcentaje de biodiésel en la mezcla (fig. 10) y un comportamiento contrario respecto a la cantidad de oxígeno en el escape. También se produce una disminución de la temperatura de los gases de escape, que está relacionada con el menor poder calórico del combustible, y como resultado final hay una disminución de la emisión de CO₂ (Xue *et al.*, 2011).

Referente al oxígeno en los gases de escape, a medida que aumentó el porcentaje de biodiésel en la mezcla hubo un incremento del contenido de oxígeno, al igual que al comparar el incremento de la carga del motor (fig. 11). El aumento en el contenido de oxígeno puede estar relacionado con varios factores, entre estos el contenido estructural de oxígeno en el biodiésel (el cual no está presente en el combustible diésel) y la variación de la relación aire-combustible en el motor al cambiar el tipo

de combustible, que es lógico que aumente con el incremento de la carga del motor, pues hay mayor cantidad de aire a la entrada.

Los resultados de este estudio constituyen los primeros en bancos del biodiésel producido en Cuba a partir de *J. curcas*, en diferentes regímenes de trabajo del motor, y permiten establecer estrategias para los siguientes ensayos, sobre todo en la primera fase de determinación del porcentaje en la mezcla, antes de realizar ensayos de larga duración en el motor. Se encontró una considerable reducción en las emisiones de gases contaminantes sin comprometer las prestaciones del motor, lo cual permite pasar a una segunda etapa de incremento del porcentaje de biodiésel en la mezcla.

Conclusiones

El biodiésel de *J. curcas* combustionó en menor tiempo que el combustible diésel. Se constató un in-

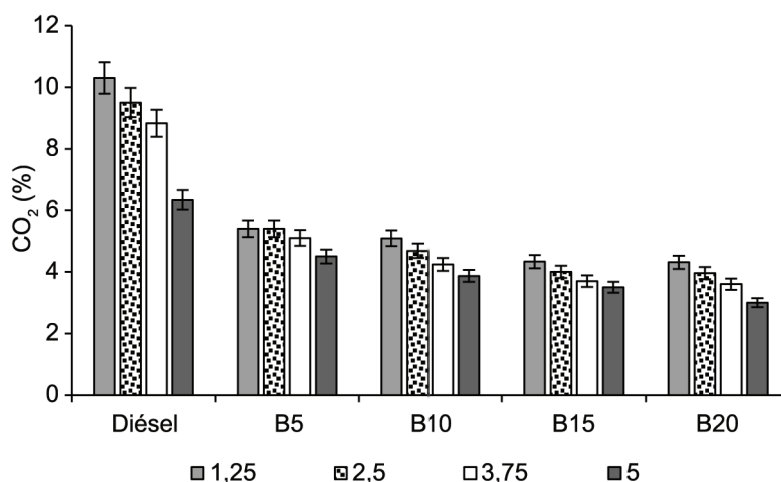


Figura 10. Emisiones de CO₂ a 1 800 rpm y con variación en la carga del motor.

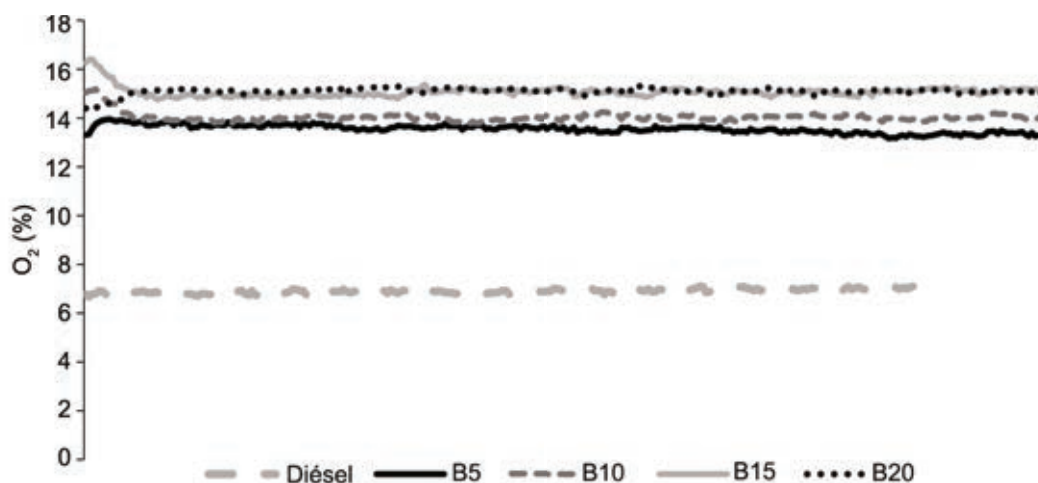


Figura 11. Contenido de oxígeno en el escape a 1 800 rpm y 1,25 Kw.

cremento de la presión en la cámara de combustión para el caso de las pruebas con un motor monocilíndrico, y de manera apreciable en la presión de inyección de combustible con las mezclas. Asimismo, se produjo una reducción considerable de las emisiones de CO, CO₂ y NO_x cuando se empleó el biodiésel mezclado con diésel hasta un 20 %, con un incremento del contenido de dióxígeno en el escape.

Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto BIoMAS-CUBA, por el suministro de biodiésel y su caracterización; así como al Consejo Flamenco de Intercambio entre Universidades (VLIR), de Bélgica, a través del proyecto «Célula de conocimientos en biocombustibles a partir de fuentes no comestibles y materiales de desecho para su uso en motores de combustión interna», mediante el cual fueron adquiridas todas las instalaciones experimentales utilizadas en la investigación.

Referencias bibliográficas

- Agarwal, A. K.; Bijwe, J. & Das, L. M. Effect of biodiesel utilization of wear of vital parts in compression ignition engine. *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power*. 125 (2):604-611, 2003. DOI: <http://doi.org/10.1115/1.1454114>.
- Banapurmath, N. R.; Tewari, P. G. & Hosmath, R. S. Performance and emission characteristics of a DI compression ignition engine operated on Honge, *Jatropha* and sesame oil methyl esters. *Renew. Energ.* 33 (9):1982-1988, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.11.012>.
- Barua, P. K. Biodiesel from seeds of *Jatropha* found in Assam, India. *IJEIC*. 2 (1):53-65, 2011.
- Bhuiya, M. M. K.; Rasul, M. G.; Khan, M. M. K.; Ashwath, N.; Azad, A. K. & Hazrata, M. A. Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel. Part 2: Properties, performance and emission characteristics. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 55:1129-1146, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.086>.
- Deshmukh, S. B. & Patil, D. V. Properties of *Jatropha curcas* oil and diesel blend as a fuel for C.I. engines. *Int. J. Eng. Manag. Res.* 7 (1):163-171, 2017.
- Dharma, S.; Hassan, M. H.; Ong, H. C.; Sebayang, A. H.; Silitonga, Arridina S.; Kusumo, F. *et al.* Experimental study and prediction of the performance and exhaust emissions of mixed *Jatropha curcas*-Ceiba pentandra biodiesel blends in diesel engine using artificial neural networks. *J. Clean. Prod.* 164:618-633, 2017.
- Lapuerta, M.; Armas, O. & Rodríguez-Fernández, J. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Prog. Energy Combust. Sci.* 34 (2):198-223, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.07.001>.
- Li, L.; Wang, J.; Wang, Z. & Xiao, J. Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with diesel/biodiesel/pentanol fuel blends. *Fuel*. 156:211-218, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.048>.
- Nitiëma-Yefanova, Svitlana; Tschamber, Valérie; Richard, R.; Thiebaud-Roux, Sophie; Bouyssié, B.; Bonzi-Coulibaly, Yvonne L. *et al.* Ethyl biodiesels derived from non-edible oils within the biorefinery concept. Pilot scale production and engine emissions. *Renew. Energ.* 109:634-645, 2017.
- Piloto-Rodríguez, R., Coord. *Biocombustibles para su uso en motores Diesel. Experiencias del Proyecto Internacional Célula de conocimientos en biocombustibles (a partir de fuentes no comestibles y materiales de desecho) para su uso en motores de combustión interna*. La Habana: CUJAE, 2014.
- Piloto-Rodríguez, R.; Goyos-Pérez, L.; Alfonso, Marlen; Duarte, Milagros; Caro, R.; Galle, J. *et al.* Thermal behavior of *Jatropha curcas* oils and their derived fatty acid ethyl esters as potential feedstocks for energy production in Cuba. *J. Therm. Anal. Calorim.* 109 (2):1005-1012, 2012. DOI: <http://10.1007/s10973-011-1827-8>.
- Piloto-Rodríguez, R.; Sánchez-Borroto, Yisel; Lapuerta, M.; Goyos-Pérez, L. & Verhelst, S. Prediction of the cetane number of biodiesel using artificial neural networks and multiple linear regression. *Energy Convers. Manag.* 65:255-261, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.07.023>.
- Ribas, W. F.; Bilotta, Patricia; Janissek, P. R.; Carvalho Filho, M. A. S. da & Neto, R. A. P. Influência do combustível (diesel e biodiesel) e das características da frota de veículos do transporte coletivo de Curitiba, Paraná, nas emissões de NO_x. *Eng. Sanit. Ambient.* 21 (3):437-445, 2016.
- Sahoo, P. K.; Das, L. M.; Babu, M. K. G.; Arora, P.; Singh, V. P.; Kumr, N. R. *et al.* Comparative evaluation of performance and emission characteristics of *jatropha*, *karanja* and *polanga* based biodiesel as fuel in a tractor engine. *Fuel*. 88 (9):1698-1707, 2009.
- Shahabuddin, M.; Liaquat, A. M.; Masjuki, H. H.; Kalam, M. A. & Mofijur, M. Ignition delay, combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 21:623-632, 2013.
- Tiwari, S. & Sahu, D. Prospects of using vegetables, *Jatropha curcas* and Algae oils for biodiesel production. *Int. J. Drug Discovery Herbal Res.* 3 (3):368-372, 2013.
- Toral, Odalys; Iglesias, J. M.; Montes de Oca, S.; Sotolongo, J. A.; García, S. & Torsti, M. *Jatropha curcas* L., una especie arbórea con potencial energético en Cuba. *Pastos y Forrajes*. 31 (3):191-207, 2008.
- Tüccar, G.; Özgür, T. & Aydin, K. Effect of diesel-microalgae biodiesel-butanol blends on performance and emissions of diesel engine. *Fuel*. 132:47-52, 2014.
- Xu, H.; Yin, B.; Liu, S. & Jia, H. Performance optimization of diesel engine fueled with diesel-*Jatropha curcas* biodiesel blend using response surface methodology. *J. Mech. Sci. Technol.* 31 (8):4051-4059, 2017.
- Xue, J.; Grift, T. E. & Hansen, A. C. Effect of biodiesel on engine performances and emissions. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 15 (2):1098-1116, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.016>.

Recibido el 6 de abril del 2018

Aceptado el 14 de octubre del 2018