

# Evaluación del funcionamiento de motores de combustión interna trabajando con biodiesel.

**R. Piloto Rodríguez\***, **R. Sierens\*\***, **S. Verhelst\*\***, **N. Ferrer Frontela\***.

\*Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables. Facultad de Ingeniería Mecánica  
Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría*.

Calle 114 esq. 127, Marianao 15, Ciudad de la Habana, Cuba

E – mail: rpiloto@ceter.cujae.edu.cu

\*\* Laboratory of Flow, Heat, & Combustion Mechanics. Ghent University. Belgium.

E-mail: Roger.Sierens@ugent.be, Sebastian.Verhelst@ugent.be

(Recibido el 15 de junio de 2008; aceptado el 22 de julio de 2008)

## Resumen

En el presente trabajo se determinó la característica exterior de velocidad para dos motores de combustión interna trabajando con combustible biodiesel procedente de varias fuentes naturales y se comparó con la característica exterior de velocidad de los motores originalmente trabajando con combustible diesel. Los motores fueron evaluados con variaciones de carga y velocidad. En uno de los motores ensayados fue determinada la presión en el interior de la cámara de combustión con el objetivo de evaluar el retardo de ignición. Fue observado que los motores trabajando con combustible biodiesel presentaban una disminución de la potencia efectiva y un aumento del consumo específico de combustible. Se observó una disminución del retardo de ignición cuando fue empleado el combustible biodiesel. También fue observado que los gases contaminantes, excepto las emisiones de NOx y CO, disminuyen o permanecen constantes con el uso del biocombustible.

**Palabras claves:** Motores de combustión interna, biodiesel, emisiones, característica exterior de velocidad, retardo de ignición.

## 1. Introducción.

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, fundamentalmente en países de Europa, Estados Unidos y Brasil, un tema de primer orden en el desarrollo tecnológico. Como se conoce, la producción y uso de biocombustibles puede generar problemas éticos asociados a la crisis alimentaria si no se manejan adecuadamente.

En Cuba, se han estado realizando en los últimos años investigaciones importantes en temas de biocombustibles, en especial el bioetanol y el biodiesel [1-3]. En este trabajo solo se hará referencia al biodiesel.

El biodiesel es una alternativa energética real que manejada adecuadamente, no compite con la producción de alimentos [4]. Al respecto, una parte importante de los productores en el mundo están centrando la producción de biodiesel partiendo de plantas oleaginosas no comestibles como la *Jatropha* e

*Higuereta*, que además ofrecen los mayores rendimientos por hectáreas de biodiesel [5].

Los motores diesel al trabajar con biodiesel experimentan una pérdida de potencia debida principalmente al menor poder calorífico del biodiesel, aunque esto se ve compensado con el hecho de ser este un recurso renovable y sin impacto negativo en el medio ambiente [6,7]. Por otra parte, se conoce que su utilización en un Motor de Combustión Interna (MCI) puede traer algunos problemas de desgaste y problemas de depósitos en los inyectores [8].

En ese sentido, una vez que se conocen las ventajas y desventajas cualitativas del empleo del biodiesel en los MCI es necesario evaluar cuantitativamente la aptitud de los MCI trabajando con combustible biodiesel. Es en ese sentido, que el objetivo del presente trabajo está dirigido a caracterizar el desempeño de dos tipos de motores con similares características técnicas trabajando con combustible diesel convencional y diferentes tipos de biodiesel. El desempeño de los MCI será valorado en base al consumo específico de combustible, la potencia efectiva, el torque, el retardo de ignición y las emisiones de gases de la combustión.

Particularmente, el desempeño de los MCI será evaluado mediante la característica exterior, determinada de manera convencional para diferentes valores de frecuencia de giro y conocimiento de las variaciones de la potencia efectiva ( $N_e$ ), el torque efectivo ( $T_e$ ) y el consumo específico de combustible (CEC) cuando se trabaja con la máxima dosificación de combustible y con variaciones de la carga.

## 2 – Materiales y métodos.

Para la realización de los ensayos fueron empleados dos bancos de pruebas de MCI. Las características técnicas principales de los dos motores estudiados se muestran en la Tabla 1.

En el caso del motor A se realizaron pruebas con biodiesel obtenido a partir de aceite de soya (BD-soya) y diesel.

En el caso de las pruebas con el motor B fueron utilizados dos tipos de combustibles biodiesel, uno de ellos a partir de aceite de palma (BD-palma) y otro a partir de aceite de colza (BD-colza).

En el motor A, la medición del gasto de combustible o consumo específico se realizó con aplicación del método gravimétrico y las emisiones de NO<sub>x</sub> fueron medidas con un analizador de gases con capacidad de medición entre 0 y 3000 ppm  $\pm$  1ppm. Las pruebas para la confección de la característica exterior fueron realizadas en el rango de velocidades 1000-2800 rpm.

En el motor B, un sistema de válvula de frenado con agua fue utilizado como carga externa. Las pruebas se realizaron en todos los casos para los valores de torque fijos y predeterminados: 138, 277 y 415 Nm.

Para evaluar el retardo de ignición en ángulos de giro fue empleado el motor B. Este motor permite realizar mediciones de presión en la parte superior del cilindro de combustión y alternativamente medir la presión en el cilindro y en la caja del cigüeñal. Ambas señales de presión fueron leídas por una tarjeta de adquisición de datos con una resolución de 1° de giro del cigüeñal. Mediante las mediciones de presión y haciendo uso del software Matlab 7.0 se obtenía la primera derivada de la función de presión en la cámara de combustión en dependencia de los ángulos de giro de cigüeñal. Conociendo el punto en que la primera derivada de presión comienza a aumentar drásticamente puede ser establecido el inicio de la combustión en ángulos de giro del cigüeñal y considerando el instante de inyección (338°) fue posible determinar el retardo de ignición en ángulos de giro y convertirlo en unidades de tiempo en milisegundos. Un gráfico ilustrativo de las curvas obtenidas, en el caso de una muestra de BD-Palma se muestra en la Fig. 1.

El motor B fue acoplado a un analizador de gases para la medición de emisiones de NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y HC.

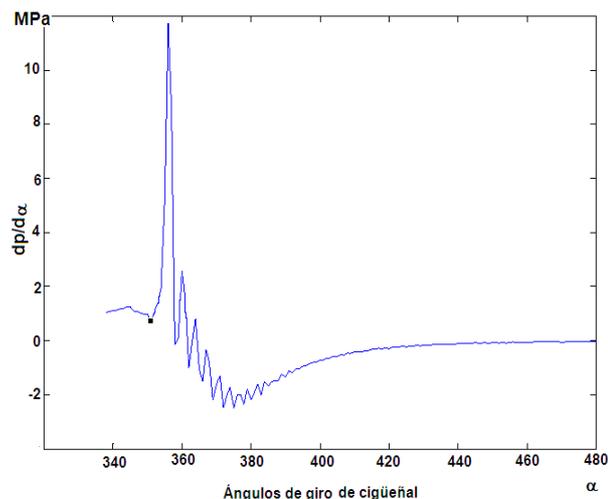


Figura 1 - Primera derivada de presión en la cámara de combustión en dependencia del ángulo de giro del cigüeñal para motor B trabajando con biodiesel de aceite de palma (BD-palma)

A los combustibles biodiesel valorados le fueron realizadas mediciones de viscosidad dinámica y densidad. Las mediciones de viscosidad se realizaron con un viscosímetro RION VT 03-F con un vaso metálico para la muestra de 460 mL de capacidad, equipado con diferentes rotores acordes al rango de viscosidad de la muestra analizada. Las mediciones se realizaron con precisión de 1mPaS para mediciones en el rango entre 1,5-33mPaS y con precisión de 5mPaS para mediciones entre 15-150mPaS.

La densidad de las muestras fue analizada con un picnómetro estándar de 25 mL de capacidad. La medición de masas del picnómetro vacío y lleno con las muestras se realizó con una balanza de precisión de 0,1g.

## 3 – Resultados experimentales.

Derivadas de las mediciones, los resultados de las propiedades físicas de los combustibles se muestran en la Tabla 2. Para la obtención de la característica exterior de velocidad en el motor A, trabajando a diferentes velocidades con diesel (patrón) y con biodiesel, se determinaron los parámetros de potencia efectiva ( $N_e$ ) en kW, torque efectivo en ( $T_e$ ) en Nm y consumo específico de combustible (CEC) en g/kW-h.

En las Figuras 2 y 3 se muestran las características exteriores de velocidad obtenidas al motor A trabajando con combustible diesel y BD-soya respectivamente. En ellas se evidencia un aumento de los parámetros analizados con el aumento de las rpm, excepto el torque efectivo que acusa un máximo alrededor de las 2000 rpm. Los resultados obtenidos son similares a los reportados por otros autores [9,10]. En el caso del

consumo específico se observa un valor mínimo y también cercano a las 2000 rpm.

Tabla 1. Características técnicas de los motores utilizados

Item	Motor A	Motor B
Marca	Yuchai	Volvo
Modelo	YC61108Q	TD60 B
Tipo	Vertical, en línea, cuatro tiempos, enfriamiento por agua.	Vertical, en línea, cuatro tiempos, enfriamiento por agua.
Sistema de inyección	Inyección directa	Inyección directa
Numero de cilindros	6	6
Diámetro del cilindro (mm)	108	98
Desplazamiento total (cm <sup>3</sup> )	6871	5480
Proporción de compresión	16,5:1	16,0:1
Potencia nominal (kW)	100	120
Velocidad de rotación nominal (rpm)	2800	2800
Torque máximo (Nm)	428	428

Tabla 2. Propiedades físicas de los combustibles empleados

Propiedades	BD-Soya	BD-Colza	BD-Palma	Diesel
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,881	0,884	0,876	0,846
Viscosidad dinámica (mPaS)	6,8	6,5	6,4	5,0

En las dos características exteriores de velocidad obtenidas al motor A se observa una tendencia muy similar de los parámetros analizados en todo el rango de velocidades. El torque efectivo en ambos casos tiene un máximo alrededor de las 2000 rpm. La pérdida de momento efectivo tomando como referencia al diesel es de hasta un 17% para el motor trabajando con combustible BD-soya. Es evidente que el tipo de combustible ejerce influencia sobre las características indicadoras debido a que puede ocasionar variación en los parámetros de inyección y de atomización, la capacidad de evaporación y la inflamabilidad [11].

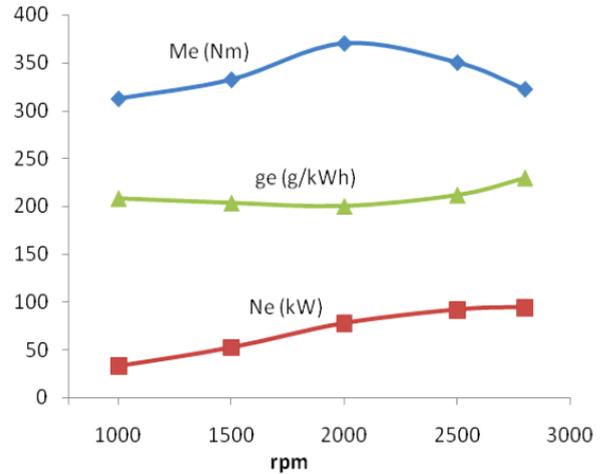


Figura 2 - Característica exterior de velocidad obtenida en el motor A con combustible diesel.

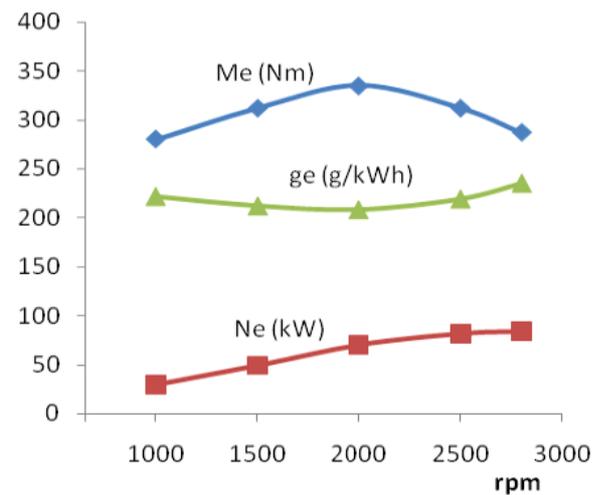


Figura 3 - Característica exterior de velocidad obtenida en el motor A con combustible BD-soya.

Respecto al consumo específico de combustible (CEC), se observó el mismo comportamiento general y típico en un motor de combustión interna, fue corroborada una disminución del consumo con el aumento de las rpm debido a mejora del proceso de combustión, hasta un punto a partir del cual la calidad del proceso de combustión comienza a disminuir debido a un empeoramiento del aprovechamiento de la energía calorífica. En este punto se alcanza el valor máximo de eficiencia indicadora y eficiencia mecánica. Es de observar que este punto de mínimo en el CEC coincidió con el máximo torque debido a la correlación existente entre ambos parámetros. El aumento del CEC fue observado mayor entre un 6-7% para el motor trabajando con biodiesel comparado con el diesel. Se

han reportado resultados similares con un aumento del consumo específico de combustible para pruebas con mezclas de BD-soya [12,13] y esto se debe al menor poder calórico del biodiesel respecto al diesel.

Los resultados asociados a la potencia efectiva, revelaron el conocido aumento de su valor con incrementos de la velocidad de rotación del motor. Aunque la potencia es un parámetro directamente proporcional al torque y a la velocidad de rotación, fue observado a partir de la velocidad a torque máximo que la disminución del torque en la potencia efectiva se compensaba con aumento de la velocidad y fue reportada una ligera tendencia a variaciones menores o valores casi constantes de potencia efectiva, según se observa en las Figs. 2 y 3. La comparación de las características de comportamiento para el motor A ensayado con ambos combustibles evidenció pérdidas de potencia cuando se utiliza combustible BD-soya en el orden del 16%. Se han reportado resultados similares con mezclas de diesel y biodiesel, así como con biodiesel puro [13].

Respecto a las emisiones de NO<sub>x</sub>, en las pruebas con el motor A no se observaron diferencias significativas entre los combustibles tal como se observa en la Fig.4.

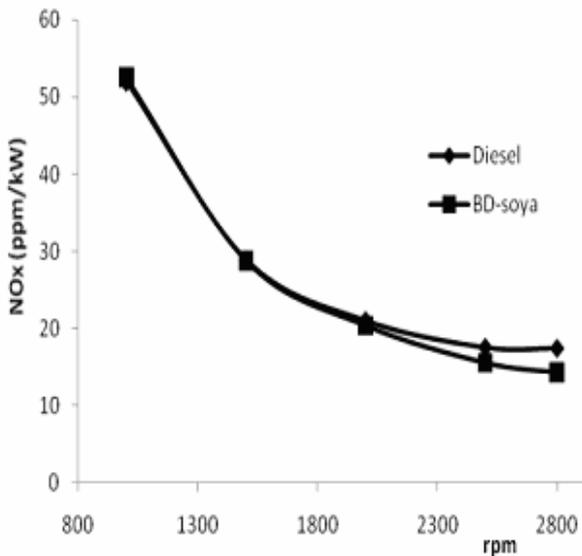


Figura 4 – Comportamiento de emisiones de NO<sub>x</sub> en motor A.

En las pruebas con el motor B, los resultados para consumo específico de combustible de las muestras analizadas en dicho motor trabajando a un torque 277 Nm se resumen en la Fig.5. Resultados similares se obtuvieron con otros valores de torque.

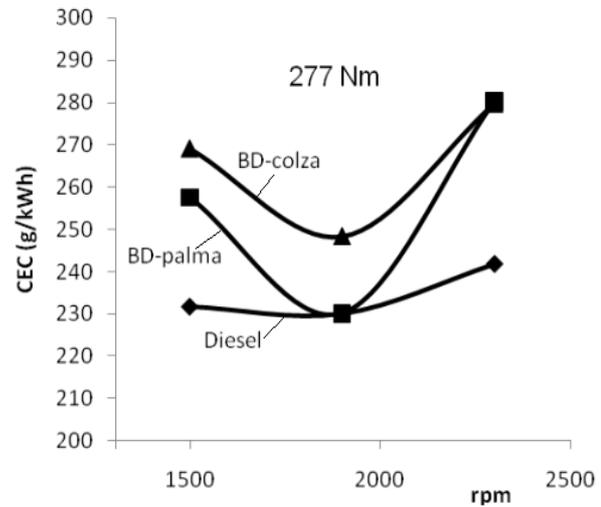


Figura 5 - Consumo específico de combustible para ensayos en motor B trabajando a un torque de 277 Nm.

En estos resultados se observa como el CEC es superior al obtenido con combustible diesel cuando se utiliza cualquiera de los dos tipos de biodiesel con excepción de un punto experimental.

En la comparación del consumo entre ambos combustibles biodiesel, utilizados en los ensayos con el motor B, no se observa una tendencia a la superioridad de uno con respecto al otro. Los resultados comparativos con el diesel en el caso del consumo de combustible en el motor B están acordes a los obtenidos con el motor A en otras condiciones experimentales y con BD-soya. En cuanto al CEC se observa nuevamente que este parámetro incrementa su valor al cambiar de combustible diesel a biodiesel, de igual forma que en las pruebas reportadas anteriormente con el motor A.

El análisis de las emisiones de inquemados (HC) en el motor B demostró que estas emisiones son en todos los casos mayores con la utilización de combustible diesel, según puede ser observado en la Fig. 6. En cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> no se registraron diferencias significativas para los diferentes tipos de combustibles analizados.

Una compilación de los resultados referidos a las emisiones de NO<sub>x</sub> en el motor B se muestra en la Fig. 7. Estas emisiones son referidas a la unidad de potencia efectiva desarrollada para igual carga que los resultados previamente mostrados en este trabajo. Contrario a lo obtenido para el motor A, en este caso se observó un aumento en las emisiones de NO<sub>x</sub> cuando se utiliza biodiesel. Este resultado está acorde con lo observado en anteriores investigaciones [10, 12, 14 - 16] y se debe a que el biodiesel por su mayor índice de cetano debe tener un menor retardo de ignición, por tanto su proceso de combustión comienza más rápido y debe alcanzar mayores temperaturas en la cámara de combustión, lo cual favorece a la formación de NO<sub>x</sub>. Comparando los

resultados obtenidos en los dos motores, se reproduce el comportamiento asociado a que aumento de las rpm disminuye la carga contaminante de NOx. El rango de variación registrado con ambos motores fue bastante similar.

En el caso de las emisiones de CO ocurre todo lo contrario a lo observado para las emisiones de HC, observándose en todos los casos, mayores emisiones de este gas con el uso de biodiesel. Los resultados correspondientes a las pruebas a torque de 277 Nm según se muestra en la Fig.8.

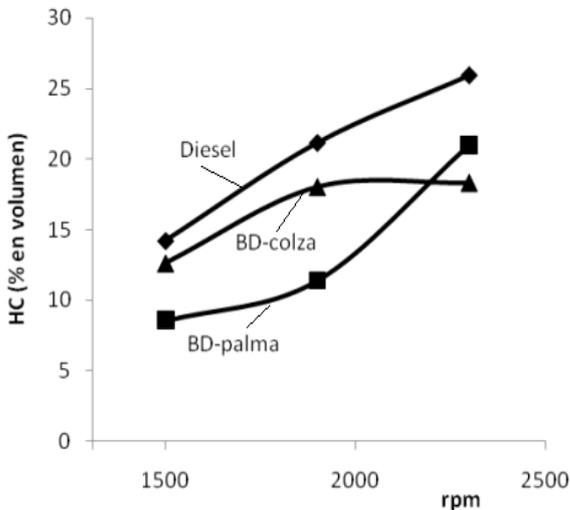


Figura 6 - Emisiones de HC a torque de 277 Nm en motor B

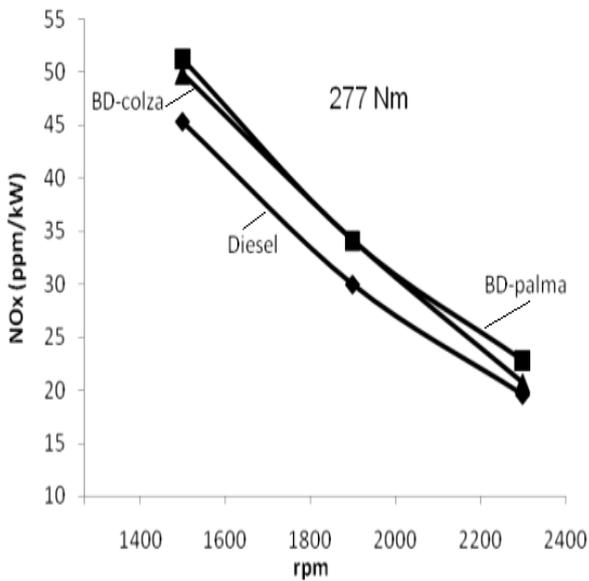


Figura 7 - Emisiones de NOx a torque de 277 Nm en motor B.

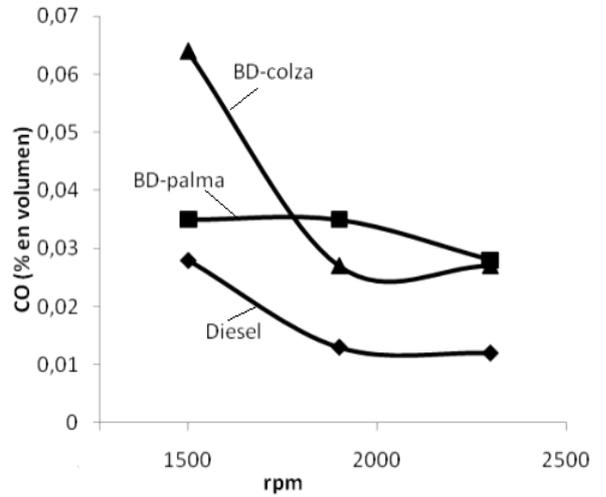


Figura 8 - Emisiones de CO a torque de 277 Nm con motor B.

Por último, se obtuvieron los estimados de retardo de ignición para cada punto experimental mediante el método descrito en el acápite anterior utilizando los datos de presión en el interior de la cámara de combustión. Los resultados se muestran en la Tabla 3 en milisegundos. Se observa como en la mayoría de los casos el retardo de ignición es menor en los ensayos de motores trabajando con muestras de biodiesel respecto al diesel. Como anteriormente fue explicado, esto se debe al mayor índice de cetano en el biodiesel.

Tabla 3. Valores de retardo de ignición en motor B.

rpm	Torque (Nm)	Retardo de ignición (ms)		
		Diesel	BD-Palma	BD-colza
1500	138	0,72	0,72	0,78
1900	138	0,74	0,60	0,57
2300	138	0,69	0,58	0,54
1500	277	0,67	0,67	0,72
1900	277	0,69	0,56	0,44
2300	277	0,63	0,51	0,58
1500	415	0,78	0,61	0,67
1900	415	0,66	0,51	0,57
2300	415	0,58	0,47	0,47

#### 4 - Conclusiones.

- En las pruebas con el motor A trabajando con combustible biodiesel se observó un aumento del consumo específico de combustible, disminución de la potencia efectiva y del torque efectivo.
- Las emisiones de NOx en el motor A no variaron significativamente cuando se utilizó combustible biodiesel.
- En las pruebas con el motor B, se observó un aumento del consumo específico de combustible cuando se utilizaron ambas muestras de biodiesel.

- Con el uso de biodiesel en el motor B fue observado que aumentan las emisiones de CO y NO<sub>x</sub>, disminuyen las emisiones de inquemados (HC) y no se reportaron cambios apreciables en las emisiones de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>.
- En las pruebas con el motor B fue observado que el retardo de ignición es menor cuando se utiliza biodiesel, lo cual evidencia el mayor índice de cetano del biodiesel respecto al combustible diesel.

## Referencias.

1. Lopez I. et al. *Evaluación y optimización de la conversión de aceite de girasol en Biodiesel*. Facultad de Ingeniería Mecánica. UCLV. V Conferencia Internacional de Energía Renovable CIER 2007.
2. Sotolongo J.A. et al. *Potencialidades energéticas y medioambientales del árbol *Jatropha Curcas* en las condiciones edafoclimáticas de la región semiárida de la provincia Guantánamo*. CATEDES. V Conferencia Internacional de Energía Renovable CIER 2007.
3. Alfonso M.C. *Desarrollo de aditivos para mezclas carburantes con etanol*. Programa de desarrollo energético sostenible. ICINAZ. 2006.
4. Openshaw K. *A review of *Jatropha Curcas*. An oil plant of unfulfilled promise*. Biomass and Bioenergy. 19. 2000. 1-15.
5. Sarin R., Sharma M., Sinharay S., Malhotra R.K. **Jatropha-Palm Biodiesel blends. An optimum mix for Asia**. Fuel. 84. 2007. 1365-1371.
6. Demirbas A. *Biodiesel. A realistic fuel alternative for diesel engines*. Springer-Verlag. Londres. 2008.
7. Fajardo, J., Meza, J y otros. *Estudio del desempeño mecánico y ambiental de los motores de encendido por compresión al utilizar biodiesel como combustible*. Informe Técnico. Grupo de investigaciones EOLITO. 2006. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Bolívar.
8. Agarwal A.K., Bijwe J., Das L.M. *Effect of biodiesel utilization of wear of vital parts in compression ignition engines*. Transactions of the ASME. 125. 2003. 604-611.
9. Heywood J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill. 1988.
10. Kumar A. D. *Life cycle analysis of BD production from *simauroba glauca* and its application in CI engine*. Tesis de Doctorado. Indian Institute of Technology. Delhi. 2008.
11. Knothe G. *Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters*. Fuel processing technology. 86. 2005. 1059-1070.
12. Gerpen J.H., Chang D.Y.Z. *Fuel properties and engine performance for BD prepared from modified feedstocks* SAE, SP 1997, SP-1274. 153-172.
13. Neto da Silva, Salgado A., Rocha J. *Technical feasibility assessment of oleic sunflower methyl ester utilization in diesel bus engines* Energy conversion & management. 2003. 44. 2857-2878.
14. Akasaka Y. Suzuki T., Sakurai Y. *Exhaust emissions of a DI diesel engine fueled with blends of BD and low sulfur diesel fuel*. SAE 972998. 1997.
15. Pramanik K. *Properties and use of *Jatropha curcas* oil and diesel fuel blends in compression ignition engine*. Renewable Energy. 2003. 28. 239-248.
16. Raheman H., Phadatare A.G. *Diesel engine emissions & performance from blends of karanja methyl ester and diesel*. Biomass & Bioenergy. 2004. 27. 393.

---

## Evaluation of engine performance working with biodiesel.

### Abstract:

The engine outer velocity characterization for two engines was made working with biodiesel from different natural sources, and its performance was compared with the engine parameters using reference diesel. The engines were used varying load and velocity. The ignition delay was obtained by measurement of in-cylinder pressure. A decrease in the effective power and increase in the effective fuel consumption were observed in the engines when biodiesel is used. Biodiesel samples shown shorter ignition delay than diesel. The pollutants emitted for the engine using biodiesel was lower than diesel, with the exception of NO<sub>x</sub> and CO emissions.

**Key words:** engine, biodiesel, emissions, outer velocity characteristic, ignition delay.