



## Caracterización de un motor diesel trabajando con mezclas de aceite de Jatropha y combustible diesel

### *Characterization of a diesel engine fueled with Jatropha oil and diesel fuel blends*

Michel - Errasti Cabrera  
Ramón - Piloto Rodríguez  
Noel - Ferrer Frontela

Eliezer Ahmed - Melo Espinosa  
Antonio - Werner de Dios Ortega  
Leonardo - Goyos Pérez

Recibido: Enero del 2013  
Aprobado: Abril del 2013

#### Resumen/ Abstract

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar el desempeño de un motor diesel en cuanto a sus prestaciones y al retardo de la ignición, al operar bajo diferentes regímenes de carga, empleando mezclas de aceite de Jatropha y combustible diesel. Para esto se determinó la característica exterior de velocidad al emplear las mezclas, y se compararon estos resultados con los obtenidos durante los ensayos con combustible diesel patrón; estableciendo el grado de afectación del motor al sustituir parte del combustible diesel por aceite de Jatropha. Se observó una disminución del torque y la potencia efectiva, y un aumento del consumo específico de combustible al emplear un mayor porcentaje de aceite de Jatropha en las mezclas. Por otra parte, en comparación con el combustible diesel, el retardo de la ignición no mostró una variación significativa al emplear las mezclas de aceite de Jatropha y combustible diesel.

**Palabras clave:** aceite de Jatropha curcas, característica exterior de velocidad, motor diesel, retardo de la ignición.

*The present study aims to characterize the benefits of a diesel engine in terms of performance and ignition delay, operating under different loading regimes, using Jatropha oil and diesel fuel blends. We determined the speed exterior feature when using mixtures, and compared these results with those obtained during tests with standard diesel fuel, establishing the degree of involvement of the engine to replace some diesel fuel for Jatropha oil. There was a decrease in the torque and effective power, and increased specific fuel consumption by using a higher percentage of Jatropha oil in blends. Moreover, compared to diesel fuel, the ignition delay showed no significant variation by employing Jatropha oil and diesel fuel blends.*

**Key words:** Jatropha curcas oil, outer velocity characteristic, diesel engine, ignition delay.

#### INTRODUCCIÓN

La disminución acelerada de las reservas mundiales de combustibles fósiles y la inestabilidad en sus precios, ha motivado que la comunidad científica dirija grandes esfuerzos hacia el estudio e implementación de los combustibles alternativos. La utilización de aceites vegetales en motores diesel podría contribuir a la reducción de nuestra dependencia energética sobre el petróleo.

Para ello, se hace indispensable garantizar el adecuado funcionamiento de los motores de encendido por compresión, así como, alcanzar el máximo rendimiento posible al emplear aceites vegetales como combustible [1-2]. Los primeros reportes sobre el uso de aceites vegetales en motores de combustión interna datan de finales del siglo XIX y principios del siglo XX. En 1892 el ingeniero alemán Rudolf Diesel patentó el motor diesel; y para el año 1900, durante la Exposición Mundial de París, el Dr. Diesel consiguió mostrar al mundo su invento, utilizando 100 % de aceite de maní como combustible [3-4].

Hoy en día, la producción y uso de biocombustibles (dentro de los cuales clasifican los aceites vegetales) es un tanto controversial; ya que si estos factores no se manejan adecuadamente pueden generar problemas éticos asociados a la crisis alimentaria. El debate está polarizado entre quienes plantean que su uso solo conllevará al incremento en los precios de los alimentos, mientras que otros mantienen el criterio de que éstos son beneficiosos para la economía de los países que los producen. Con el propósito de aportar soluciones a esta disyuntiva, una parte importante de los productores a nivel mundial están centrados en la producción de aceites vegetales a partir de plantas oleaginosas no comestibles, como la *Jatropha curcas* o la higuera. Desde hace algunos años la India viene incrementando su producción de aceite de *Jatropha* notablemente. Este arbusto, originario de México, produce frutos oleaginosos, no comestibles y por tanto no compite directamente con los alimentos. Otro elemento importante, relacionado con la *Jatropha*, es que puede cultivarse fácilmente en zonas áridas y semiáridas, siendo capaz incluso de revitalizar tierras degradadas [5-7].

Al emplear aceites vegetales como combustible para motores diesel, estos experimentan pérdidas de potencia, debido fundamentalmente al menor poder calorífico de los aceites; aunque esta dificultad se ve compensada con el hecho de ser los aceites vegetales un recurso renovable, con menor impacto sobre el medio ambiente. Otros problemas que trae aparejado la utilización de aceites vegetales en los motores diesel son la taponamiento de los inyectores, desgaste de las partes móviles, así como la aparición de depósitos de carbono en la cámara de los pistones, como consecuencia de las reacciones de polimerización de los ácidos grasos no saturados durante el proceso de combustión [8-9]. Actualmente se han desarrollado algunas técnicas para obtener derivados de aceites vegetales cuyo rendimiento y propiedades se comporten de manera similar a las del combustible diesel. Entre estas técnicas tenemos: micro-emulsión, pirólisis, transesterificación y mezclas controladas de combustible diesel y aceites vegetales [3].

Para caracterizar el desempeño de un motor diesel al utilizar combustible diesel, mezclas controladas de aceites vegetales y combustible diesel o aceites vegetales puros se hace necesario evaluar la potencia efectiva, el torque efectivo, el consumo específico de combustible y el retardo de la ignición. Este último es muy importante, pues repercute en varios de los parámetros del proceso de combustión y por consiguiente en el desempeño del motor. Se considera que la forma apropiada de evaluar el retardo de la ignición, es a través del análisis de la variación de la presión en la cámara de combustión [10-11].

Una vez conocidas las ventajas y desventajas (reportadas en la literatura) relacionadas con el uso de aceites vegetales como sustitutos del combustible diesel, surge la necesidad de evaluar el comportamiento de los bancos de motores diesel al trabajar con mezclas de aceites vegetales y combustible diesel. En este sentido, el presente trabajo está dirigido a caracterizar el desempeño de un motor diesel en cuanto a sus prestaciones y al retardo de la ignición, operando bajo diferentes regímenes de trabajo y empleando combustible diesel convencional y mezclas, a diferentes porcentajes, de aceite de *Jatropha curcas* y combustible diesel.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los combustibles utilizados para las pruebas fueron el combustible diesel (D) común, como patrón de referencia, y dos mezclas a diferentes porcentajes de aceite de *Jatropha curcas* y combustible diesel. Dichas mezclas fueron preparadas con un vaso de precipitados (Beaker) de 400 mL, una probeta graduada de 100 mL con un error de 1 mL y un agitador manual. No se utilizó 100% de aceite de *Jatropha* para los ensayos, pues se carecía del sistema de precalentamiento de combustible, necesario para disminuir la viscosidad del aceite antes de su introducción al motor. Para identificar las mezclas se utilizó la siguiente nomenclatura:

- DJ10: mezcla de aceite de *Jatropha curcas* al 10 % y combustible diesel al 90 %.
- DJ20: mezcla de aceite de *Jatropha curcas* al 20 % y combustible diesel al 80 %.

Se le realizaron mediciones de densidad y viscosidad dinámica a las tres variantes de combustibles. La densidad ( $\rho$ ) de las muestras fue analizada con un picnómetro estándar de 25 mL de capacidad volumétrica. Para determinar la masa del picnómetro cuando estaba vacío y cuando estaba cargado de combustible se utilizó una balanza Sartorius (modelo EA6DCE-1) con precisión de 0,1 g. Una vez conocidos el volumen ( $v$ ) y la masa ( $m$ ) de las muestras de combustibles se calculó el valor de la densidad a través de la ecuación (1). Los valores de viscosidad dinámica ( $\eta$ ) para los tres combustibles fueron obtenidos mediante un viscosímetro VISCOTESTER VT-03F, utilizando la escala de medición que va de 1-33 mPa·s, con un error de 1 mPa·s. Las mediciones se realizaron a 27 °C.

$$\rho = m / v \quad (\text{g} / \text{cm}^3) \quad (1)$$

Los ensayos se realizaron en un banco de pruebas de motores diesel (ver figura 1), dotado con el equipamiento técnico necesario para realizar mediciones en motores de encendido por compresión. El motor diesel se encuentra montado sobre una bancada de vigas de acero, sujetado mediante tornillos. Sus especificaciones técnicas más importantes se muestran en la tabla 1. Los gases de escape son extraídos desde el colector de gases hacia el exterior del local a través de un conducto. El motor está acoplado mediante una transmisión cardánica a un freno hidráulico, que se utiliza para simular las condiciones de explotación del motor. El control del sistema de frenado hidráulico brinda la posibilidad de variar la carga externa ejercida sobre el motor, y así, probar su desempeño bajo diferentes regímenes de trabajo.

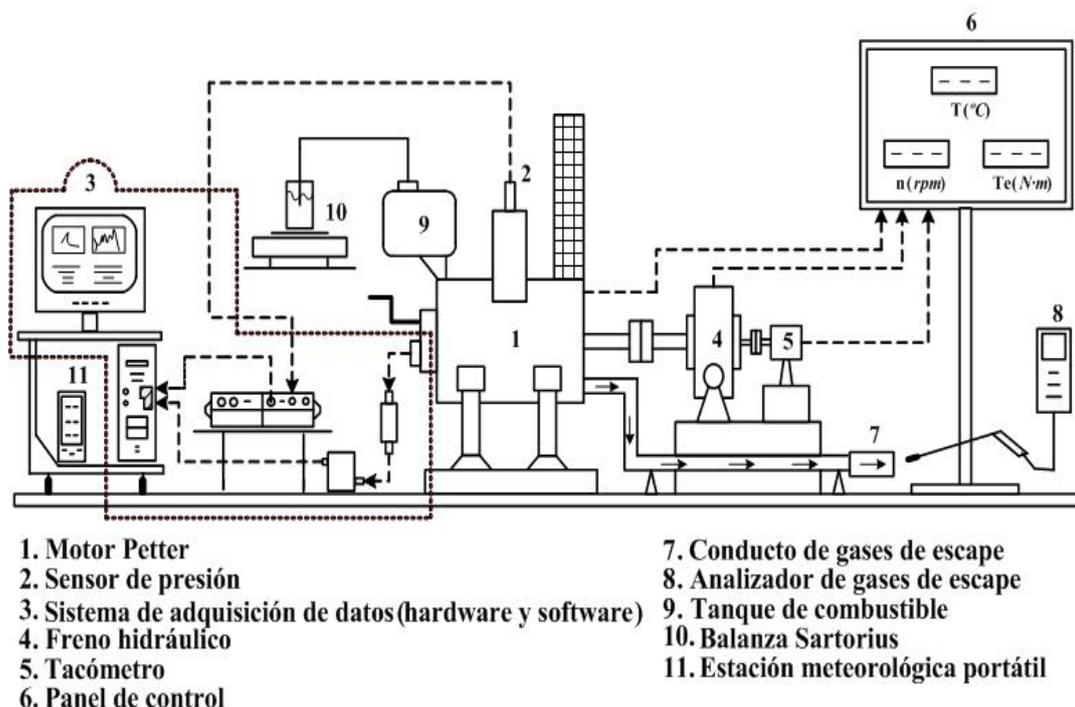


Fig. 1. Esquema del banco de pruebas de motores diesel.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del motor diesel.	
ITEM	ESPECIFICACIONES
MARCA	PETTER
TIPO	VERTICAL, 4 TIEMPOS, ENFRIAMIENTO POR AGUA.
SISTEMA DE INYECCIÓN	INYECCIÓN DIRECTA
NÚMERO DE CILINDROS	1
DIÁMETRO DEL CILINDRO (MM)	87,3
CAPACIDAD CÚBICA DEL CILINDRO (CM <sup>3</sup> )	659
RELACIÓN DE COMPRESIÓN	16,5 :1
POTENCIA NOMINAL (KW); A N=2000 RPM	6,12
FRECUENCIA NOMINAL (RPM)	2000
TORQUE MÁXIMO (N·M); A N=428 RPM	292,35

Los valores de torque efectivo ( $T_e$ ) y frecuencia de rotación ( $n$ ) se leyeron directamente desde los indicadores de los instrumentos de medición y control, ubicados en el panel de control. El consumo de combustible horario ( $Gh$ ) se determinó mediante un método gravimétrico, que consiste en medir el tiempo ( $t_c$ ) en que se consume una determinada masa de combustible ( $m_c$ ), sin retorno al tanque. Para todos los ensayos la masa de combustible consumido fue de 4 g. Una vez que se obtuvieron los resultados de las mediciones de  $t_c$  se aplicó la ecuación (2), [12]. Las mediciones de  $m_c$  se realizaron con una balanza Sartorius, modelo EA6DCE-1, con precisión de 0,2 g. La potencia efectiva ( $Ne$ ) y el consumo específico de combustible (CEC) se determinaron mediante las ecuaciones (3 y 4), respectivamente [12-13].

$$Gh = 3,6 \frac{m_c}{t_c} \quad (\text{kg} / \text{h}) \quad (2)$$

$$Ne = n \frac{\pi}{30} \cdot \left( \frac{T_e}{1000} \right) \quad (\text{kW}) \quad (3)$$

$$CEC = \frac{1000 - Gh}{Ne} \quad (\text{g} / \text{kW} \cdot \text{h}) \quad (4)$$

Se emplearon el combustible diesel de referencia y las dos mezclas DJ10 y DJ20 para obtener la característica exterior de velocidad del motor en cada caso, con el fin de determinar las variaciones que sufren el torque efectivo, la potencia efectiva y el consumo específico de combustible versus la frecuencia de rotación, cuando el motor recibe la máxima dosificación de combustible. Los pasos para realizar los ensayos y obtener la característica exterior de velocidad del motor fueron ejecutados según [14-15]. La frecuencia de rotación se regula variando paulatinamente la carga en el freno. Tanto para el combustible diesel como para las mezclas DJ10 y DJ20 el rango de frecuencia de rotación durante las pruebas fue de 1200-1800 rpm, tomando lecturas cada 1000 rpm. Se realizaron dos réplicas por cada experimento.

El retardo de la ignición ( $\tau$ ) se obtiene de la diferencia entre el comienzo de la combustión y el comienzo de la inyección (ver figura. 2), [10-11]. Para ello se realizan mediciones de presión en la cámara de combustión del cilindro, las cuales son registradas por un sistema de adquisición de datos que está constituido por un módulo instrumental Kistler (hardware), soportado sobre una plataforma LabVIEW 8.6 (software). Las señales de presión fueron leídas por una tarjeta de adquisición de datos con una resolución de  $1^\circ$  de rotación del cigüeñal. Una vez registrados los datos de presión en el interior de la cámara, se procesan con un algoritmo desarrollado con Microsoft Office Excel 2010; a través del cual se generan los diagramas típicos de variación de presión en la cámara de combustión en función de los ángulos de rotación del cigüeñal ( $dP/d\theta$  vs.  $\theta$ ). Al analizar el diagrama se establece el punto en que la primera derivada de la presión aumenta drásticamente; este instante se corresponde con el ángulo de rotación del cigüeñal en el instante en que comienza la combustión ( $\theta_2$ ). Por otra parte, el ángulo de rotación del cigüeñal en el instante en que comienza la inyección de combustible ( $\theta_1$ ) se determina mediante la ficha técnica del motor; siendo  $\theta_1 = 336^\circ$  para frecuencias de rotación entre 1200-1650 *rpm*, mientras que para frecuencias de rotación entre 1651-1800 *rpm*  $\theta_1 = 332^\circ$ .

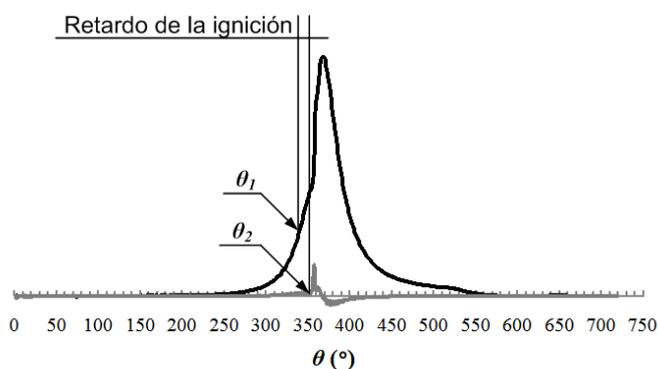


Fig. 2. Retardo de la ignición.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades físicas de los combustibles influyen considerablemente sobre la desintegración del chorro de combustible y las dimensiones de las gotas. Con el aumento de la viscosidad empeoran la finura y la uniformidad de pulverización del combustible. Mientras que el efecto de la densidad sobre la pulverización y las dimensiones de las gotas depende de los parámetros constructivos del pulverizador. La viscosidad que presentan los aceites vegetales puros es muy superior a la del combustible diesel convencional [16], ésta característica puede provocar taponamiento en los filtros, conductos e inyectores al utilizar aceites vegetales puros y sin precalentar, como combustible para motores diesel. Con la intención de reducir estos efectos perjudiciales se utilizan mezclas controladas de aceites vegetales y combustible diesel, cuyas propiedades físicas se aproximan a las del combustible diesel común. Los resultados de la viscosidad dinámica y la densidad de los combustibles analizados en este trabajo se presentan en la tabla 2. Según reportes de Azoumah [17] y Bajpai [9], las diferencias entre las propiedades físicas de las mezclas DJ10 y DJ20 con las propiedades físicas del combustible diesel de referencia no representan grandes afectaciones para el funcionamiento del motor diesel.

Tabla 2. Propiedades físicas de los combustibles analizados.			
PROPIEDAD	D	DJ10	DJ20
$P$ (G/CM <sup>3</sup> )	0,893	0,902	0,911
$H$ (MPA-S)	3,4	5,0	7,2

Para obtener la característica exterior de velocidad del motor diesel, al trabajar con combustible diesel (patrón) y con las dos mezclas DJ10 y DJ20, se determinaron los parámetros torque efectivo ( $T_e$ ), potencia efectiva ( $N_e$ ) y consumo específico de combustible (CEC), operando bajo diferentes regímenes de carga. Los resultados comparativos del torque efectivo entre las mezclas DJ10 y DJ20 y el combustible diesel de referencia se muestran en la figura 3.

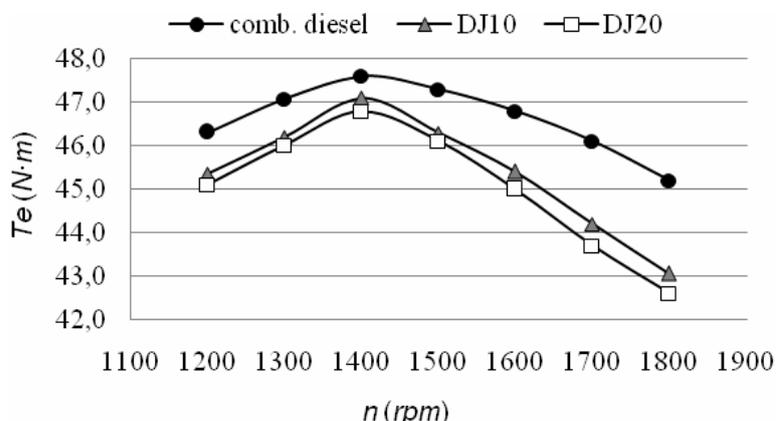


Fig. 3. Comparación del torque efectivo entre los combustibles analizados.

Se observa una disminución del torque efectivo a medida que aumenta el porcentaje de aceite en las mezclas. La disminución del torque, tomando como referencia al combustible diesel, es de hasta un 4,6 % para el motor trabajando con DJ10 y de hasta un 5,8 % para el motor trabajando con DJ20. Estos resultados están relacionados con el menor poder calórico de los aceites vegetales y están en correspondencia con la literatura consultada [8-9, 18].

Cuando se compara el CEC entre las tres variantes de combustibles analizados (ver figura 4), se observa un aumento del mismo con el incremento del porcentaje de aceite vegetal en la mezcla. El aumento del CEC tomando como referencia al combustible diesel patrón, es de hasta un 6,4 % para el motor trabajando con DJ10 y de hasta un 11,3 % para el motor trabajando con DJ20. Estos resultados guardan relación con el menor poder calórico de los aceites vegetales, en comparación con el combustible diesel, y se corresponden con los observados en la literatura [8, 18-19].

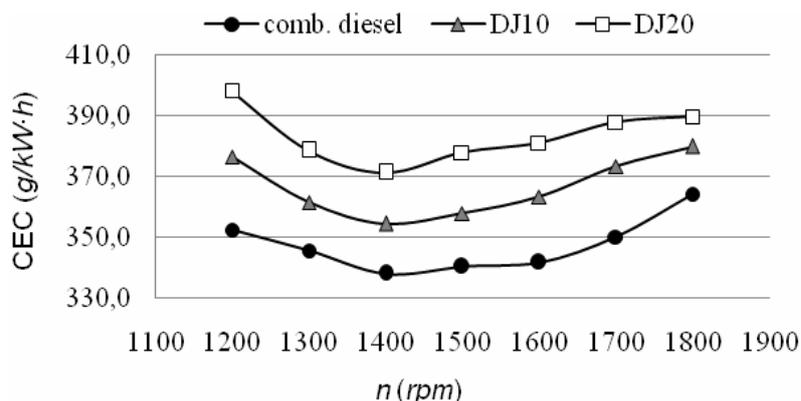


Fig. 4. Comparación del CEC entre los combustibles analizados.

Para las tres muestras de combustibles se observa que el torque efectivo presenta un valor máximo alrededor de las 1400 rpm, que se corresponde con el valor mínimo del CEC, evidenciándose la correlación existente entre ambos parámetros. Esto está relacionado con la eficiencia volumétrica. Cuando la frecuencia de rotación aumenta, la resistencia del sistema en la admisión crece. A pesar de que la temperatura media de las superficies transmisoras de calor se eleva, la temperatura de calentamiento de la carga disminuye, debido a que el tiempo de intercambio de la carga disminuye; como consecuencia de ello, al aumentar la frecuencia de rotación el rendimiento volumétrico aumenta al principio con la frecuencia de rotación y luego comienza a decrecer a partir de una determinada frecuencia [12], (que en el caso del motor analizado está alrededor de las 1400 rpm). Es decir con el aumento de la frecuencia de rotación

mejora el 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 [18]. Como se observa en todos los experimentos realizados, los valores máximos de torque efectivo y mínimos de CEC son dependientes de las características del motor, más que de las características del combustible.

En cuanto a la potencia efectiva, los gráficos comparativos entre los tres combustibles analizados se muestran en la figura 5. En todas las variantes de combustibles se observa un incremento gradual de la potencia al aumentar la frecuencia de rotación. Éste es un comportamiento lógico, pues la potencia efectiva es un parámetro directamente proporcional al torque efectivo (que aumenta hasta las 1400 *rpm* y a partir de este punto comienza a disminuir), pero también es directamente proporcional a la frecuencia de rotación [12, 16, 18], por lo que la disminución del torque a partir de las 1400 *rpm* se ve compensado con el aumento de la frecuencia de rotación; lo cual se hace evidente en los gráficos de potencia, al observarse un ligero cambio en la pendiente después de las 1400 *rpm*, suavizándose ligeramente las curvas de potencia; lo que se traduce en una ligera tendencia a disminuir la variación entre los valores de potencia, a medida que aumenta la frecuencia de rotación.

Las pérdidas de potencia efectiva observadas en el motor durante los ensayos con las mezclas fueron de hasta un 4,7 % para DJ10 y de hasta un 5,9 % para DJ20, tomando como referencia al combustible diesel. Estos valores se corresponden con los reportados en la bibliografía [3, 8-9, 17] y están relacionados con el menor poder calórico de los aceites vegetales, en comparación con el combustible diesel.

Para las tres variantes de combustibles se observa una tendencia muy similar de los parámetros analizados en todo el rango de frecuencias de rotación del motor. En los resultados de las pruebas se evidencia una disminución del torque y la potencia efectiva, y un aumento del consumo específico de combustible con el incremento del porcentaje de aceite de *Jatropha* en las mezclas, observándose que el tipo de combustible ejerce influencia sobre las características indicadoras del motor, debido fundamentalmente a que puede ocasionar variación en los parámetros de inyección, atomización, capacidad de evaporación, inflamabilidad y retardo de la ignición; esto indica la necesidad de variar el ángulo de avance de la inyección para lograr restablecer, en parte, las características de trabajo del motor [12].

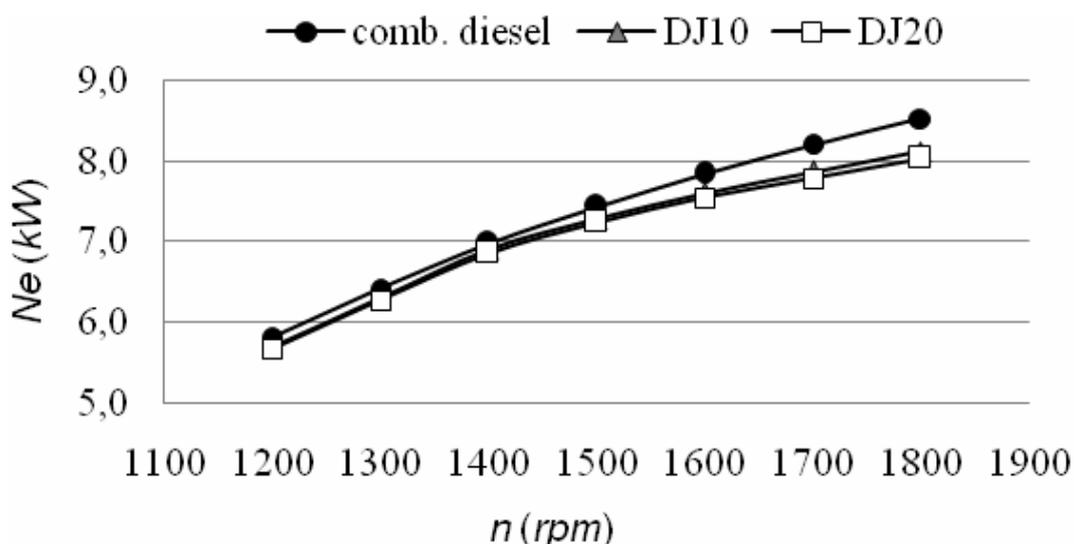


Fig. 5. Comparación de la potencia efectiva entre los combustibles analizados.

Por último, se obtuvieron los estimados del retardo de la ignición para cada punto experimental. Los valores numéricos se presentan en la tabla 3.

<b>Tabla 3. Resultados del retardo de la ignición para los tres combustibles analizados.</b>			
<b><i>N</i> (RPM)</b>	<b><i>T</i>(°)</b>		
	<b>D</b>	<b>DJ10</b>	<b>DJ20</b>
1200	16	16	15
1300	17	16	16
1400	17	16	17
1500	18	17	17
1600	18	19	19
1700	23	24	24
1800	24	25	25

Al comparar los resultados de las mezclas DJ10 y DJ20 con los resultados del combustible diesel de referencia, se observa que en cada punto experimental (es decir, en cada valor de frecuencia de rotación) el retardo de la ignición presenta un comportamiento bastante similar, evidenciándose apenas una diferencia máxima de un grado en el tiempo de retardo de la ignición para cada una de las mezclas analizadas, en comparación con el combustible diesel; lo cual se traduce en un resultado satisfactorio, si tenemos en cuenta que la tarjeta de adquisición de datos utilizada durante las pruebas presenta una resolución de 1° de rotación del cigüeñal, por lo que se puede asegurar que, independientemente de su menor índice de cetano, las mezclas DJ10 y DJ20 no provocaron una variación significativa en el tiempo de retardo de la ignición, al compararlas con el combustible diesel; ya que todos los valores de retardo de la ignición obtenidos durante los ensayos se encuentran dentro del rango de errores de la tarjeta de adquisición de datos.

## CONCLUSIONES

Las diferencias entre las propiedades físicas de las mezclas de aceite de *Jatropha curcas* y combustible diesel y las propiedades físicas del combustible diesel de referencia no representan grandes afectaciones para el funcionamiento del motor diesel. En los resultados de las pruebas en el motor diesel se observa que el tipo de combustible provoca variación en el torque efectivo, en la potencia efectiva y en el consumo específico de combustible.

Se evidencia que con el aumento del porcentaje de aceite de *Jatropha curcas* en las mezclas aumenta el consumo específico de combustible y disminuyen el torque y la potencia efectiva. Esto está relacionado con el menor poder calórico del aceite vegetal, y para lograr una compensación de estos parámetros debe variarse el ángulo de avance de la inyección en el motor. En comparación con el combustible diesel, las mezclas DJ10 y DJ20 no provocaron una variación significativa en el tiempo de retardo de la ignición, independientemente de su menor índice de cetano.

## REFERENCIAS

- [1] GANAPATHY, T.; *et al.*, "Performance optimization of *Jatropha* biodiesel engine model using Taguchi approach". *Applied Energy*, 2009, vol.86 , n.11, p. 2476–2486, ISSN 0306-2619.
- [2] NECATI OZSEZEN, A., *et al.*, "Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters". *Fuel*, 2009, vol.88 , n.4, p. 629–636, ISSN 0016-2361.
- [3] AGARWAL, A.K., "Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines". *Journal Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, vol.33, n.3 , p. 233–271, ISSN 0360-1285.
- [4] SÁNCHEZ BORROTO, Y., *et al.*, "Predicción del número de cetano de biocombustibles a partir de su composición de ácidos grasos". *Ingeniería Mecánica*, 2012, vol.15, n 2, p. 147-157, ISSN 1815-5944.
- [5] PILOTO RODRÍGUEZ, R., *et al.*, "Thermal behavior of *Jatropha curcas* oils and their derived fatty acid ethyl esters as potential feedstocks for energy production in Cuba". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, vol.90, n.2, p. 1-10, ISSN 1388-6150.
- [6] AKBAR, E., *et al.*, "Characteristic and composition of *Jatropha curcas* oil seed from malaysia and its potential as biodiesel feedstock". *European Journal of Scientific Research*, 2009, vol.29, n.3, p. 396-403, ISSN 1450-216X.
- [7] PILOTO RODRÍGUEZ, R., *et al.*, "Characterization of pure oils and biodiesel obtained from two different *Jatropha curcas* plantations in Cuba for their use in internal combustion engines". *Biomass and Bioenergy*, 2011, vol.35, n.9, p. 4092-4098, ISSN 0961-9534.
- [8] AGARWAL , D., *et al.*, "Performance evaluation of a vegetable oil fuelled compression ignition engine". *Renewable Energy*, 2008, vol.33, n.6, p. 1147-1156, ISSN 0960-1481.
- [9] BAJPAI, S., *et al.*, "Feasibility of blending karanja vegetable oil in petro-diesel and utilization in a direct injection diesel engine". *Fuel*, 2009. vol. 88 ,n. 4, p. 705-711, ISSN 0016-2361.
- [10] PILOTO RODRÍGUEZ, R., *et al.*, "Ignition delay in a palm oil and rapeseed oil biodiesel fuelled engine and predictive correlations for the ignition delay period". *Fuel*, 2011, vol.90, n.2, p. 766-772, ISSN 0016-2361.
- [11] ASSANIS, D.N., *et al.*, "A predictive ignition delay correlation under steady-state and transient operation of a direct injection diesel engine". *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, vol.125, n.2, p. 450-457, ISSN 1528-8919.
- [12] HEYWOOD, J.B., "Internal Combustion Engine Fundamentals". 1988, Nueva York: McGraw-Hill Inc., ISBN 978-0-07-028637-5.
- [13] MELO ESPINOSA, E.A., "Evaluación de un motor de encendido por chispa trabajando con mezclas etanol-gasolina". *Ingeniería Energética*, 2012, vol.33, n.2, p. 94-102, ISSN 1815-5901.
- [14] VILLARROEL, J.M., *et al.*, "La planificación del combustible en las grandes flotas de vehículos (caso UDECAM y ASTRO)". VII Conferencia Internacional de Energía Renovable (CIER 2007). Ahorro de Energía y Educación Ambiental, 2007. Ciudad de la Habana, p. 1180-1189, ISBN 978-959-282-051-7.

- [15] Norma Cubana - ISO 15550: 2006. "*Motores de combustión interna — Determinación y métodos para la medición de la potencia del motor — Exigencias generales*". Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de la Habana.
- [16] PILOTO RODRÍGUEZ, R., et al., "*Investigation on biodiesel obtained from different feedstocks. Chemical analysis and engine performance*". [Conference]. 13th European Automotive Congress (EAEC 2011), 2011, Valencia, Spain. 10 p., ISBN 9788461517947.
- [17] AZOUMAH, Y., et al., "*Exergy efficiency applied for the performance optimization of a direct injection compression ignition (CI) engine using biofuels*". Renewable Energy, 2009, vol.34, n.6, p. 1494-1500, ISSN 0960-1481.
- [18] PILOTO RODRÍGUEZ, R., et al., "*Evaluación del funcionamiento de motores de combustión interna trabajando con biodiesel*". Ingeniería Mecánica, 2008, vol.11, n.3, p. 33-38, ISSN 1815-5944.
- [19] PRATEEPCHAIKUL, G., et al., "*Palm oil as a fuel for agricultural diesel engines: Comparative testing against diesel oil*". Songklanakarin J. Sci. Technol., 2003, vol.25, n.3, p. 317-326, ISSN 0125-3395.

## AUTORES

### **Michel Errasti Cabrera**

Ingeniero Mecánico, Profesor Instructor. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae. La Habana, Cuba.

e-mail: [merrasti@ceter.cujae.edu.cu](mailto:merrasti@ceter.cujae.edu.cu)

### **Ramón Piloto Rodríguez**

Licenciado en Química, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor auxiliar. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae., La Habana, Cuba.

e-mail: [rpiloto@ceter.cujae.edu.cu](mailto:rpiloto@ceter.cujae.edu.cu)

### **Noel Ferrer Frontela**

Ingeniero Mecánico, Profesor Instructor. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae. La Habana, Cuba.

e-mail: [nf@ceter.cujae.edu.cu](mailto:nf@ceter.cujae.edu.cu)

### **Eliezer Ahmed Melo Espinoza**

Ingeniero Mecánico, Profesor Instructor. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae. Calle 114, # 11901, CP 19390, La Habana, Cuba.

e-mail: [emelo@ceter.cujae.edu.cu](mailto:emelo@ceter.cujae.edu.cu)

### **Antonio Werner de Dios Ortega**

Ingeniero Mecánico, Profesor Instructor. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae., La Habana, Cuba.

e-mail: [adedios@mecanica.cujae.edu.cu](mailto:adedios@mecanica.cujae.edu.cu)

### **Leonardo Goyos Pérez**

Ingeniero mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba.

e-mail: [goyos@tesla.cujae.edu.cu](mailto:goyos@tesla.cujae.edu.cu)