

Caracterización de la combustión del biodiesel de aceite de palma en un motor diesel

John R. Agudelo S.^{*a}, Andrés F. Agudelo S.^a, Juan F. Pérez B.^a

(a) Grupo GIMEL, Universidad de Antioquia
* jragude@udea.edu.co

(Recibido: Junio 30 de 2006 - Aceptado: Octubre 6 de 2006)

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis experimental de la combustión de un motor diesel de inyección directa usando mezclas de combustible diesel convencional con biodiesel de aceite de palma al 5% y 20% en volumen. Se usa un modelo de diagnóstico de una zona para determinar parámetros característicos de la combustión tales como la presión y temperatura media máximas en cámara de combustión, tiempo de retraso, tasa de liberación de calor y duración de la combustión.

Los combustibles se ensayan en estado estacionario en 5 modos de funcionamiento definidos por el régimen de giro y el par. La forma como varían los parámetros de combustión con el grado de carga no se vio afectada por el uso de las mezclas, las cuales presentan un proceso de combustión bastante similar al combustible convencional, aunque ligeramente más lento.

PALABRAS CLAVE: de aceite de palma, diagnóstico termodinámico de combustión, modelo de una zona, motores diesel, tasa de liberación de calor

Characterization of the combustion of palm oil biodiesel combustion in a diesel engine

ABSTRACT

This work shows experimental combustion results on a direct injection diesel engine using common diesel fuel and diesel blended with palm oil biodiesel at 5% and 20% in a volumetric basis. It is used a one-zone heat release model to determine characteristic combustion parameters like the maximum averaged pressure and temperature produced inside the combustion chamber, delay time, heat release rate, and combustion duration.

These fuels are tested in stationary steady state in five operationg modes defined by engine speed and torque. Combustion parameters variation caused by load is not affected by biodiesel blends, which exhibits a combustion process similar to the regular diesel, although slightly but a little slower.

KEYWORDS: Palm oil biodiesel, Combustion thermodynamic diagnosis, diesel engines, one-zone model, palm oil biodiesel, heat release rate.

1. INTRODUCCIÓN

El comité 186 del Icontec, se encuentra actualmente elaborando la norma técnica sobre mezcla de combustibles destilados del petróleo y biocombustibles para motores diesel (DE 100/04), dando viabilidad a la ley 939 del 2004. En la reglamentación de dicha ley se ha aceptado que el biodiesel estará en una proporción del 5% en volumen, tal como lo enuncia la resolución 1289 de 2005 [1], adoptando el consenso mundial de los diferentes países y gremios relacionados en este tema [2].

En un trabajo reciente, Agudelo, A.F. [3] estudió la combustión de biodiesel de aceites vegetales usados y sus mezclas al 30% y 70% con diesel convencional en un motor de encendido por compresión (MEC) de inyección directa turboalimentado, encontrando poca diferencia en la forma de la tasa de liberación de calor y los parámetros de combustión para los combustibles estudiados. Este resultado concuerda con lo reportado por Hamasaki y colaboradores [4], quienes también estudiaron un éster metílico de aceites usados. Otros investigadores han llegado a la misma conclusión usando ésteres de aceites vegetales y de grasas animales [5, 9].

La similitud en el proceso de combustión se traduce en que el rendimiento térmico no se modifica al usar los biocombustibles [3, 10, 11], por lo que la diferencia en poder calorífico de estos y sus mezclas con diesel se refleja en un aumento del consumo específico de combustible [11].

Al mezclar diesel con biodiesel, generalmente se disminuye la presión y temperatura máximas alcanzadas en la cámara de combustión, al igual que el máximo gradiente de presión [12,14]. Como consecuencia, se obtiene una tasa de liberación de calor menor para las mezclas, especialmente en la etapa de premezcla [6, 11, 14].

En cuanto a la variación del tiempo de retraso, no hay consenso: La mayoría de los autores como Zhang y Van Gerpen [6], Senatore et al. [9], Yamane et al. [14] reportan una ligera disminución al usar biodiesel, pero algunos han encontrado un pequeño aumento para ciertas condiciones de funcionamiento y ciertos motores [12].

En este trabajo se estudia la combustión de mezclas de biodiesel de aceite de palma con diesel convencional por medio de diagnóstico termodinámico a partir de la presión en cámara. En el numeral II se describe el montaje experimental y en el III se dan las principales características del modelo construido. En el numeral IV se discuten los resultados de diagnóstico dados por el modelo y finalmente se enuncian las conclusiones más importantes de este trabajo experimental.

2. EXPERIMENTACIÓN

Las mediciones se realizaron sobre un motor Isuzu turboalimentado, de 4 cilindros en línea, inyección directa, montado en un banco de ensayos instrumentado. En la Figura 1 se muestra esquemáticamente el montaje experimental.

Se usó combustible diesel corriente, cuyas propiedades para diagnóstico se tomaron de Villalta [15] y aquellas para el Biodiesel de aceite de palma puro (B100) de Agudelo y Benjumea [16]. Las propiedades de las mezclas biodiesel-diesel al 5 y 20% en volumen (en adelante B5 y B20, respectivamente) se calcularon a partir del diesel y del B100, asumiendo condiciones de mezcla perfecta de acuerdo con el trabajo de Ramírez [17].

Los ensayos se realizaron a igualdad de potencia. Con el fin de obtener un amplio espectro del balance del motor, se emplearon 5 puntos de medida entre 1400 y 2000 rpm y entre 30 y 100 Nm.

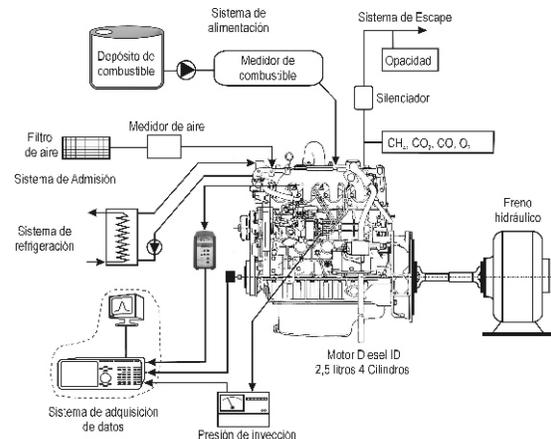


Figura 1. Vista esquemática del montaje experimental

3. MODELO DE DIAGNÓSTICO

El modelo empleado es de una zona, es decir, se consideran propiedades uniformes dentro del cilindro en cada instante. El contenido del cilindro es una mezcla de aire, combustible y productos de combustión estequiométricos. La fracción másica del combustible es del orden de 40 veces menor [18], [19]. El gas atrapado se modela como una mezcla de gases ideales de igual forma como lo han hecho Tinaut [20] y Lapuerta et al. [21]. Las propiedades termodinámicas de los gases se calculan usando la temperatura media obtenida a partir de la ecuación de estado. Las hipótesis empleadas son comunes a todos los modelos de diagnóstico de una zona [22, 26].

La composición instantánea de la mezcla, necesaria para calcular su energía interna, se determina siguiendo la evolución de las masas del sistema (Figura 2).

En esta figura los subíndices indican: a, aire, q, quemados, f, combustible, cc, cortocircuito, gr, gases residuales, CA, cierre de la válvula de admisión, AE, apertura de la válvula de escape.

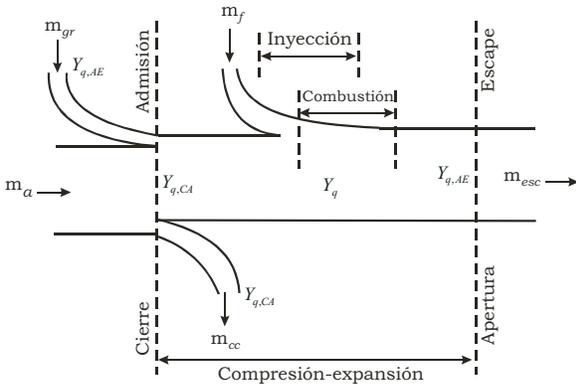


Figura 2. Evolución de las masas

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La presión en el cilindro es, en sí misma, un indicador del proceso de combustión, permitiendo una comparación directa entre combustibles. En la Figura 3 se observa que hay poca diferencia entre combustibles, siendo más marcada en la vecindad del Punto Muerto Superior (PMS).

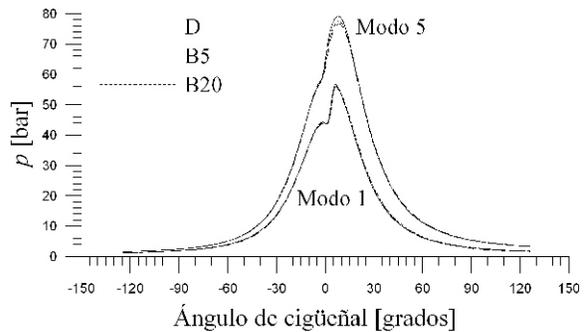


Figura 3. Curvas de presión para los modos de mínima y máxima carga

La diferencia en el proceso de compresión entre puntos de funcionamiento se debe a que los ensayos en arrastre (ausencia de combustión) se realizaron desconectando el inyector del cilindro 1, mientras los otros tres cilindros funcionaban normalmente. Por lo tanto, el grado de carga afecta directamente la masa admitida debido al turbogrupo, incrementando la presión de compresión.

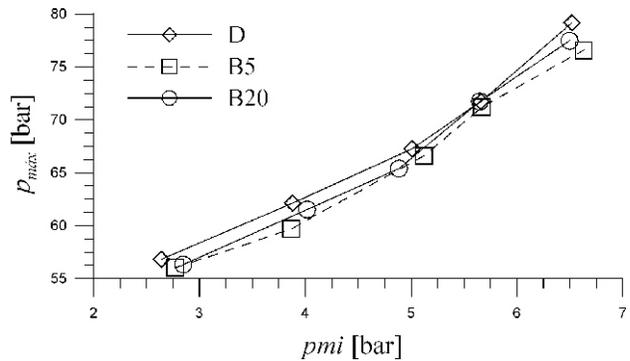


Figura 4. Presión máxima

La Figura 4 presenta la presión máxima en función del modo de funcionamiento expresado mediante la Presión Media Indicada (p_{mi}) para los combustibles utilizados. Este parámetro está relacionado de forma directa con los esfuerzos mecánicos del mecanismo biela-manivela. Al aumentar el régimen de giro lo hace la masa de aire admitida por efecto del turbocompresor, contribuyendo a que haya mayor presión en el cilindro. El aumento de carga también tiene el mismo efecto, debido a que con éste se entrega más energía a la turbina. La energía liberada aumenta con el grado de carga conduciendo a un

mayor aumento de presión durante la combustión. Se observa poca diferencia entre la presión máxima para los tres combustibles en todos los modos de funcionamiento y, en general, la presión correspondiente a diesel es ligeramente mayor.

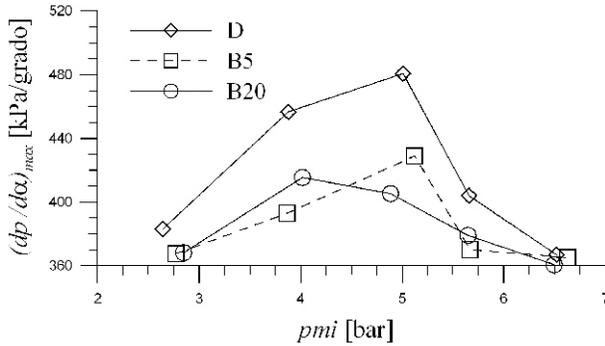


Figura 5. Máximo gradiente de presión

El gradiente de presión está directamente relacionado con el ruido producido por el motor y con la formación de NOx. En la Figura 5 se observa que el combustible diesel presenta un valor mayor que las mezclas, por lo que el motor es más silencioso al operar con éstas.

La temperatura media máxima da una idea del potencial para la formación de NOx y está directamente relacionada con la irreversibilidad del proceso de combustión.

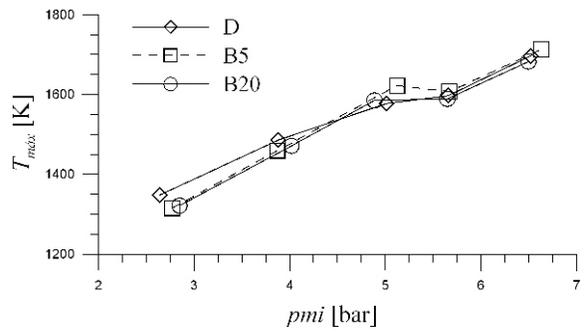


Figura 6. Temperatura media máxima

La Figura 6 muestra que a baja carga la temperatura media máxima del diesel es mayor. La diferencia se reduce al aumentar la carga en correspondencia con el comportamiento de la presión máxima (Figura 4).

El tiempo de retraso en los MEC se define como el período transcurrido desde el inicio de la inyección hasta el inicio de la combustión y está estrechamente relacionado con la capacidad que tiene el combustible para autoencender (normalmente medido como el Número de Cetano). El inicio de la inyección se midió a partir de la presión instantánea en la línea de inyección de combustible.

Cuando se levanta la aguja del inyector, la curva de presión de inyección sufre un cambio de pendiente marcado, bien sea en sentido ascendente o descendente, permitiendo identificar el inicio de la inyección [6].

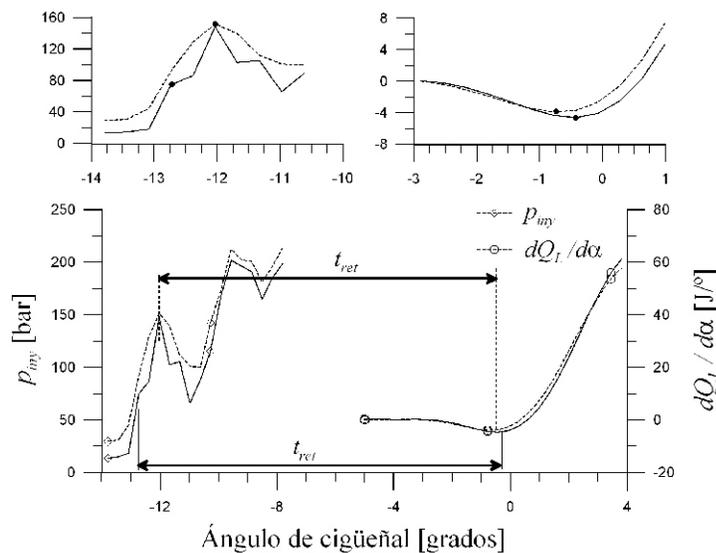


Figura 7. Determinación del tiempo de retraso

El inicio de la combustión se determina a partir de la tasa de liberación de calor. Según Heywood [27] se considera que la combustión ha comenzado cuando esta curva comienza a ser creciente. En la Figura 7 se muestra la forma como se define el tiempo de retraso. Se presentan los dos posibles casos de la forma de la presión en inyección. En la parte superior marcan los puntos de inicio de inyección y combustión, respectivamente.

Como era de esperarse, la tendencia observada para todos los combustibles es una disminución del tiempo de retraso con el grado de carga (Figura 8), debido a que se incrementa la temperatura de los gases en el cilindro.

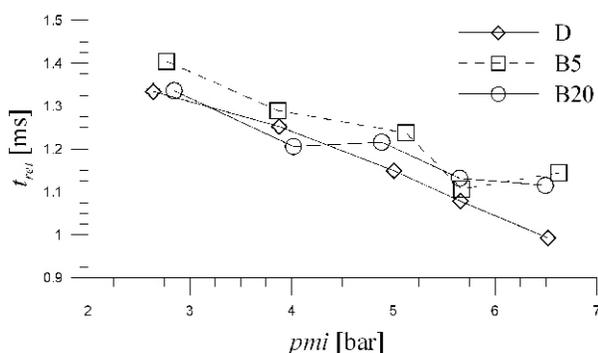


Figura 8. Tiempo de retraso

El incremento del tiempo de retraso con las mezclas se debe a la mayor viscosidad de éstas, generándose gotas más grandes que tardan más en evaporarse y mezclarse, y a la mayor temperatura de inicio de evaporación del biodiesel.

En la Figura 9 se presentan los ángulos en los que se ha quemado el 25%, 50% y 75% de la masa inyectada.

La tendencia en todos los combustibles con el punto de funcionamiento es la misma, lo que permite inferir que el proceso de combustión se desarrolla de forma similar. Se observa que los ángulos de avance de la combustión en general son mayores para las mezclas, lo que significa que su combustión es más lenta que la del combustible de referencia. Este resultado es consecuente con los menores gradientes de presión observados para estos combustibles.

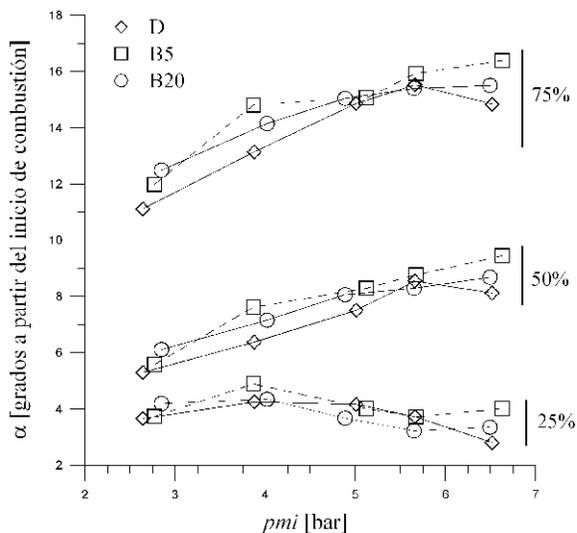


Figura 9. Avance de la combustión

En la Figura 10 se observa que, en efecto, la tasa de liberación de calor para las mezclas es ligeramente menor que la de diesel para la etapa en premezcla, lo que explica el comportamiento del máximo gradiente de presión.

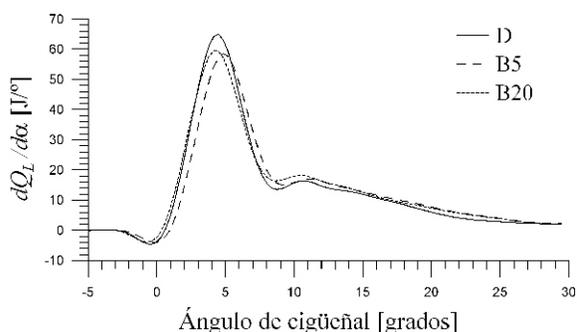


Figura 10. Tasa de liberación de calor para 1550 rpm y 50 Nm.

Las diferencias observadas en la combustión son pequeñas, de modo que el proceso global es muy similar para los combustibles ensayados. Esto se comprueba al observar la Figura 11, donde se ve el rendimiento indicado, el cual difiere del efectivo en que este último tiene en cuenta las pérdidas que se producen entre el cilindro y el cigüeñal.

El rendimiento indicado es prácticamente el mismo para los tres combustibles, y su variación con el modo de funcionamiento se debe a que al aumentar la carga el motor se acerca a su punto de máxima eficiencia.

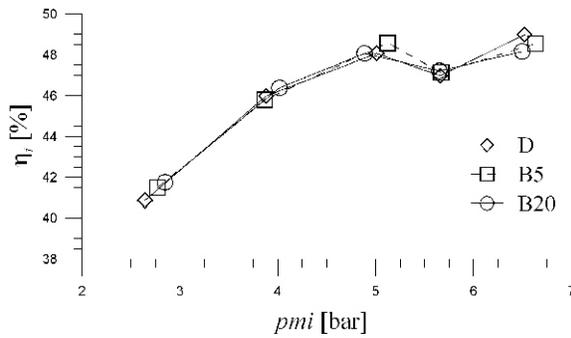


Figura 11. Rendimiento indicado

Debido a que la potencia de los modos de funcionamiento fue la misma para todos los combustibles y a que el rendimiento indicado no cambió, el menor poder calorífico de las mezclas se traduce en un mayor consumo específico indicado de combustible (Figura 12), proporcional al contenido de biodiesel en ésta. Este resultado concuerda con lo obtenido por varios investigadores [3, 10, 11].

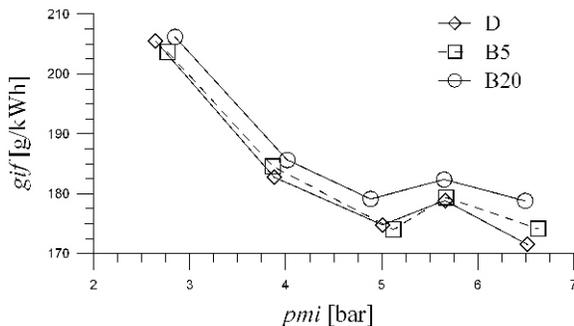


Figura 12. Consumo de combustible específico indicado

5. CONCLUSIONES

La presión en cámara de combustión para los diferentes combustibles es similar a lo largo del ciclo, presentando pequeñas diferencias en las cercanías del PMS.

La presión máxima disminuye ligeramente al usar los combustibles mezclados, pero la tendencia con el grado de carga es idéntica al combustible de referencia.

Aunque la forma en que varía el gradiente máximo de presión es similar para los tres combustibles, su valor es menor para las mezclas, indicando un proceso de combustión más lento y menos ruidoso.

La variación de la temperatura media máxima no se ve alterada al usar combustibles mezclados y en general hay pocas diferencias con el combustible de referencia.

El tiempo de retraso se comporta de forma similar para todos los combustibles ensayados, siendo ligeramente mayor para las mezclas en los modos de mayor grado de carga.

La fracción de masa quemada en premezcla es menor para las mezclas, lo que explica su menor gradiente de presión.

El proceso de combustión avanza más lentamente para las mezclas según lo indican los ángulos a los que se han quemado el 25%, 50% y 75% de la masa inyectada.

El rendimiento indicado no cambió al usar combustibles mezclados y se mantuvo la tendencia con el grado de carga, por lo que el consumo específico indicado de combustible aumenta para las mezclas de forma proporcional al contenido de biodiesel en éstas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Colciencias por financiar el proyecto 1115-05-16882. También se agradece a Akzo Nobel de Colombia (Interquim S.A.) por suministrar el biodiesel de aceite de palma y al Laboratorio de Crudos y Derivados de la Universidad Nacional sede Medellín por la caracterización de los combustibles.

7. NOMENCLATURA

- B20 Mezcla 20% Biodiesel 80% Diesel en volumen
- B5 Mezcla 5% Biodiesel 95% Diesel en volumen
- D Combustible diesel convencional
- F Dosado, relación másica entre combustible y aire
- FQL Fracción de calor liberado
- gif Consumo de combustible indicado [g/kWh]
- m Masa [kg]
- MEC Motor de encendido por compresión
- p Presión [bar]
- pmi Presión media indicada [bar]
- PMS Punto muerto superior
- T Temperatura [K]
- t Tiempo [s, ms]

Y	Fracción másica
	<i>Subíndices</i>
a	Aire
AE	Apertura de la válvula de escape
CA	Cierre de la válvula de admisión
cc	Cortocircuito
f	Combustible
gr	Gases residuales
	<i>Indicado</i>
iny	Inyección
m	Mezcla
max	Máximo
q	Productos de combustión
	<i>Caracteres griegos</i>
α	Posición angular del cigüeñal
δ	Diferencial inexacto
η	Rendimiento

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FEDEPALMA, *Resolución No.1289 de septiembre 7 de 2005*, disponible en: <http://www.fedepalma.org>.
- [2] World-Wide Fuel Charter, ACEA, *Alliance of Automobile Manufacturers*, EMA Engine Manufacturers Association, JAMA Japan Automobile Manufacturers Association, p.p. 47, 2002.
- [3] A. F. Agudelo, *Diagnóstico termodinámico de un motor Diesel de inyección directa funcionando con ésteres metílicos y aceites vegetales*, Proyecto fin de carrera, Universidad de Castilla-La Mancha, Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- [4] D. Hamasaki y otros, *Combustion characteristics of diesel engines with waste vegetable oil methyl ester*, The fifth international symposium on diagnostics and modeling of combustion in reciprocating engines (COMODIA 2001), pp. 410-416, 2001.
- [5] K. Scholl y S. Sorenson, *Combustion of soybean oil methyl ester in a direct injection diesel engine*, SAE paper No. 930934, 1993.
- [6] Y. Zhang y J. H. Van Gerpen, *Combustion analysis of esters of soybean oil in a diesel engine*, SAE paper 960765, 1996.
- [7] O. Nwafor y G. Rice, *Performance of rapeseed oil blends in a diesel engine*, Applied Energy, vol. 4, No. 4, pp. 345-354, 1996.
- [8] C. Y. Choi, G. R. Bower y R. D. Reitz, *Effects of biodiesel blended fuels and multiple injections on d.l. diesel engines*, SAE paper No. 970218, 1997.
- [9] A. Senatore, M. Cardone y V. Rocco, *A comparative analysis of combustion process in dl diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel*, SAE paper No. 2000-01-0691, 2000.
- [10] K. Schmidt y J. Van Gerpen, *The effect of biodiesel fuel composition on diesel combustion and emissions*, SAE paper No. 961086, 1996.
- [11] M. Canakci y J. H. Van Gerpen, *Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel and soybean oil biodiesel*, Paper No. 016050, ASAE Annual International Meeting, 2001.
- [12] Y. Ali y M. Hanna, *In-cylinder pressure characteristics of a D.I. heavy duty diesel engine on biodiesel fuel*, SAE paper No. 971683, 1997.
- [13] A. Shaheed y E. Swain, *Combustion analysis of coconut oil and its methyl esters in a diesel engine*, Porc. Instn. Mech. Engrs, Part A, vol. 213, pp. 417-425, 1999.
- [14] K. Yamane, A. Ueta y Y. Shimamoto, *Influence of physical and chemical properties of biodiesel fuel on injection, combustion and exhaust emission characteristics in a DI-CI engine*, The Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Reciprocating Engines (COMODIA 2001), pp. 402-409, 2001.
- [15] J. Villalta, *Implementación de un modelo termodinámico de diagnóstico de una zona para motores Diesel ID y propuesta de ampliación a dos zonas*, Proyecto fin de carrera, Universidad de Castilla-La Mancha, 2004.
- [16] J. R. Agudelo y P. Benjumea, *Biodiesel de aceite crudo de palma colombiano: Aspectos de su obtención y utilización*, ISBN: 958-655-820-7, Ed. Universidad de Antioquia, 2005.
- [17] P. Ramírez, *Caracterización de biocombustibles para motores Diesel*, Proyecto fin de carrera, Universidad de Castilla-La Mancha, 2004.

[18] O. Armas, *Diagnóstico experimental del proceso de combustión en motores diesel de inyección directa*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1998.

[19] M. Lapuerta, O. Armas y L. J. Hernández, *Diagnosis of DI diesel combustion from in-cylinder pressure signal by estimation of mean thermodynamic properties of the gas*, Applied Thermal Engineering, vol. 19, pp. 513-529, 1999.

[20] F. V. Tinaut, *Contribución al estudio del proceso de combustión en motores de encendido por compresión de inyección directa*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1986.

[21] M. Lapuerta, R. Ballesteros y J. R. Agudelo, *Effect of the gas state equation on the thermodynamic diagnostic of diesel combustion*, Applied Thermal Engineering, vol. 26, pp. 1492-1499, 2006.

[22] R. B. Krieger y G. L. Borman, *The computation of apparent heat release for internal combustion engines*, ASME, paper 66-WA/DGP-4, 1996.

[23] A. C. Alkidas, *Combustion characteristics of a single cylinder open-chamber diesel engine*, Transactions of the ASME, Journal for Engineering of Gas Turbines and Power, vol 109, pp. 419-425, 1987.

[24] M. Brun y A. Emtage, *Evaluation of burn rate routines and analysis errors*, SAE paper No. 970037, 1997.

[25] M. F. Brunt, H. Rai y A. L. Emtage, *The calculation of heat release energy from engine cylinder pressure data*, SAE paper No. 981052, 1998.

[26] M. Brunt y K. Platts, *Calculation of heat release in direct injection diesel engines*, SAE paper No. 1999-01-0187, 1999.

[27] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, International Edition, McGraw-Hill, Nueva York, 1988.