

ESTUDIO PRELIMINAR DE PRESTACIONES Y EMISIONES DE UN MOTOR DIÉSEL CON ACEITE DE FRITURA MICROFILTRADO COMO COMBUSTIBLE

CASANOVA KINDELÁN, Jesús ⁽¹⁾; FONSECA GONZÁLEZ, Natalia ⁽²⁾

jesus.casanova@upm.es

⁽¹⁾ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Industriales, Departamento de Ingeniería Energética

⁽²⁾ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. de Minas y Energía, Departamento de Energía y Combustibles

RESUMEN

La valorización energética de los aceites alimentarios residuales de procesos de fritura es actualmente una opción razonable para mejorar la sostenibilidad de la energía y reducir los residuos. Su combustión en motor de encendido por compresión (diésel) para accionar un grupo electrógeno aparece como una posibilidad de mejorar la imagen medioambiental de grandes superficies, industria alimentaria, hoteles o resorts turísticos asilados, así como para producción de energía en países en vías de desarrollo. En esta ponencia se presentan los resultados de consumo y de emisiones de un grupo electrógeno que usa un motor diésel de precámara de tres cilindros y aspiración natural que incorpora adaptaciones específicas para permitir la inyección de aceite sin transesterificar, como un sistema de calentamiento del combustible con el refrigerante del motor y un sistema automático de vaciado del aceite de fritura antes de su parada.

El aceite utilizado en estos ensayos se ha recuperado de procesos de fritura sin ningún tratamiento previo. Para su inyección en el motor se ha realizado un proceso de microfiltrado fino, con un paso de 1 μm .

El grupo electrógeno se ha hecho funcionar durante más de 100 horas a régimen nominal (1.500 rev/min con salida trifásica a 50 Hz) en condiciones variables de carga y con arranques y paradas secuenciales. Se han medido las emisiones contaminantes de CO, HC y NO_x, así como el consumo de combustible, tanto con aceite de fritura microfiltrado y como con gasóleo convencional de automoción. El grupo se conectaba a cargas resistivas con tres niveles de potencia seleccionables.

Se presentan los resultados comparados de emisiones porcentuales y de emisiones específicas medidas en varias condiciones operativas, junto con unas explicaciones de los resultados obtenidos

Palabras clave: Motores diésel, emisiones contaminantes, aceites de fritura.

1. Introducción

La utilización de aceites vegetales como combustible en motores diésel se remonta a sus orígenes pues ya Rudolf Diesel utilizó aceite de cacahuete refinado en sus primeros ensayos a finales del siglo XIX. El fuerte desarrollo de los combustibles derivados del petróleo y su relativamente bajo coste, junto con el buen rendimiento de este tipo de motores usando tales combustibles, llevó a la implantación generalizada de motores diésel consumiendo gasóleo derivado de la destilación fraccionada del petróleo. La necesidad de reducir la dependencia del petróleo y la necesidad de reducir la emisión neta de CO₂ para controlar el calentamiento global de la atmósfera ha promovido de nuevo el uso de combustibles derivados de la biomasa en los motores de combustión interna de encendido por compresión [1]. En estos motores los biocombustibles más adecuados al tipo de combustión son los aceites provenientes del prensado de plantas oleaginosas o de otros orígenes como grasas animales o algas.

El motor diesel basa su funcionamiento en el fuerte aumento de presión y temperatura del aire en la carrera de compresión, hasta más de 4 MPa y 350 °C en motores no sobrealimentados. En este aire comprimido se inyecta el combustible a alta presión, iniciándose la combustión por autoinflamación inducida por la temperatura. La atomización del combustible inyectado juega un papel fundamental en el rendimiento y en la formación de productos contaminantes, por lo que las propiedades físico – químicas del combustible afectan al desarrollo del sistema de combustión [2].

Como los motores diésel se han desarrollado para gasóleo derivado del petróleo, con unas características de densidad, viscosidad, inflamabilidad, composición, volatilidad, etc., bien definidas por los estándares y normativas internacionales, los biocombustibles de sustitución deben tener características físico – químicas no muy diferentes al gasóleo. En este sentido ha ido la tendencia a usar biodiésel en motores de automoción ya que el proceso de transesterificación del aceite vegetal original (triglicérido de ácidos grasos) con metanol produce un éster metílico que se llama comúnmente, biodiésel si cumple la norma europea EN 14214. Las propiedades del biodiésel no difieren mucho de las del gasóleo por lo que puede usarse en motores diésel sin modificar [3]. Los motores diésel de aspiración natural (no turbo-sobrealimentados) y con inyección indirecta en precámara de alta turbulencia, son menos sensibles a las propiedades del combustible, por lo que pueden ser los más viables para usar en ellos aceites vegetales crudos sin modificaciones básicas o sustanciales del motor, y además pueden usar también gasóleo [4]. También algunos fabricantes de motores, como la firma alemana Elsbett, han desarrollado motores específicamente diseñados para usar estos aceites vegetales crudos [5].

Los problemas principales de los aceites vegetales crudos están asociados con la mayor viscosidad, el menor poder calorífico, la mayor inestabilidad a la oxidación y la tendencia a degradarse con temperaturas superiores a unos 300 °C [6]. En el caso de los aceites vegetales provenientes de procesos de fritura, se añaden otros problemas como la presencia de partículas de origen diverso, la mayor acidez, la degradación que ya ha sufrido el aceite en la freidora y la falta de homogeneidad en su composición por los diversos aceites de origen usados en el proceso de cocinado; oliva, girasol, palma, soja, etc. Y por lo tanto, es esperable una significativa diferencia en las emisiones contaminantes [7].

Un motor diésel convencional diseñado para gasóleo puede funcionar con aceites vegetales crudos o de fritura, pero con una alta probabilidad se producen problemas de ensuciamiento y durabilidad, las emisiones se ven afectadas y el rendimiento se reduce [8]. Para intentar adaptar un motor diésel al aceite vegetal deben modificarse en algunos parámetros de diseño y de funcionamiento. Fundamentalmente se reduce el periodo entre revisiones y cambios del aceite lubricante, se debe precalentar el aceite para reducir su viscosidad y, si se quiere una mejor adaptación, se debe ajustar el sistema de inyección y su presión de inyección así como modificar ligeramente el punto de inyección.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo ha sido estudiar el comportamiento de un grupo electrógeno de 10 kVA usando aceite proveniente de fritura, comparando los resultados con el mismo grupo usando gasóleo. El

estudio compara la operación del grupo electrógeno en varias condiciones operativas en cuanto a operatividad y arranque, consumo de combustible y emisiones contaminantes. En esta ponencia se presentan los resultados preliminares sobre emisiones y consumo.

3. Propiedades de los combustibles

El aceite utilizado en estos ensayos tenía un típico color pardo amarillento traslúcido del aceite usado, contenía algunos restos en suspensión y un importante poso de color más claro en la parte inferior que si se agita queda en suspensión por tiempo relativamente largo. Como combustible de comparación se ha usado gasóleo A adquirido en una estación de servicio, que cumple norma EN 590. Se han medido en laboratorio químico algunas características físico – químicas del aceite de fritura y del gasóleo usado para este trabajo y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades físico – químicas medidas en los combustibles utilizados.

	Gasóleo A	Aceite fritura
Poder calorífico inferior (kJ/kg)	43.208,7	37.538,5
Densidad a 15 °C (kg/dm ³)	0,8406	0,9193
Composición C (% m/m)	85,85	77,11
H (% m/m)	13,08	11,35
O (% m/m)	0,98	11,46
N (% m/m)	0,05	0,05
S (% m/m)	0,03	0,02
Cenizas (% m/m)	0,012	0,006
Relación H/C	1,8155	1,7539
Relación O/C	0,0086	0,1116
A/F estequiométrico	14,24	12,20
Contenido en biodiésel (% v/v)	6,00	--
Viscosidad (mm ² /s)	2,87	36,82

4. Metodología de los ensayos

4.1. Preparación del aceite

El aceite de fritura utilizado era el que la empresa recicladora recupera de procesos alimentarios. Se consideró necesario realizar un prefiltrado del aceite, para retener las partículas de mayor tamaño, para luego hacer pasar el aceite por un filtro físico de paso 1 µm. El proceso de filtrado era muy lento por lo que se filtraba por lotes (sistema *batch*) a fin de tener siempre suficiente aceite preparado para el grupo. La Figura 1 muestra el esquema del sistema de microfiltrado del aceite vegetal.

4.2. Características del grupo electrógeno

El grupo electrógeno usado en esto ensayos dispone de un motor diésel de tres cilindros de inyección indirecta con bomba en línea, no sobrealimentado y sin control electrónico ni sistemas de postratamiento de gases. Es un motor convencional y por tanto fiable en entornos agresivos que puede dar hasta 21 kW a 3000 r/min pero limitado a 1500 r/min, por lo que su potencia es aproximadamente la mitad.

El grupo electrógeno necesita usar gasóleo para el arranque y dispone de un sistema de calentamiento del aceite vegetal con bomba de trasvase y un cambiador de calor que recibe calor del fluido refrigerante del motor diésel. Un conjunto de dos electroválvulas se encargan de dirigir el combustible a dicho calentador o no hacerlo cuando el grupo funciona con gasóleo. La figura 2 muestra un esquema de dicho circuito. Cada vez que el grupo se detiene, debe vaciarse el circuito de aceite vegetal y quedar cargado de gasóleo para el siguiente arranque.

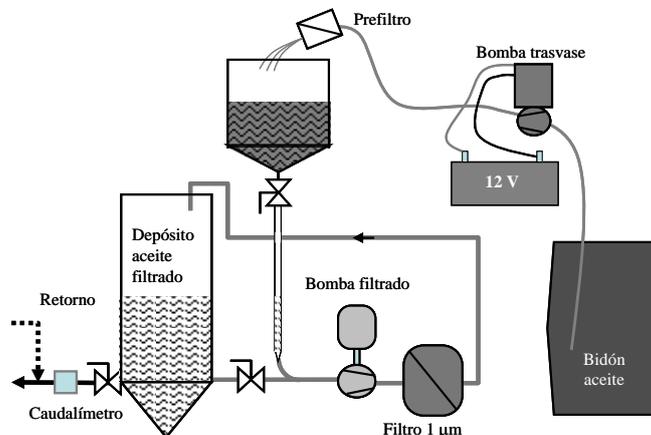


Figura 1: Sistema de microfiltrado del aceite.

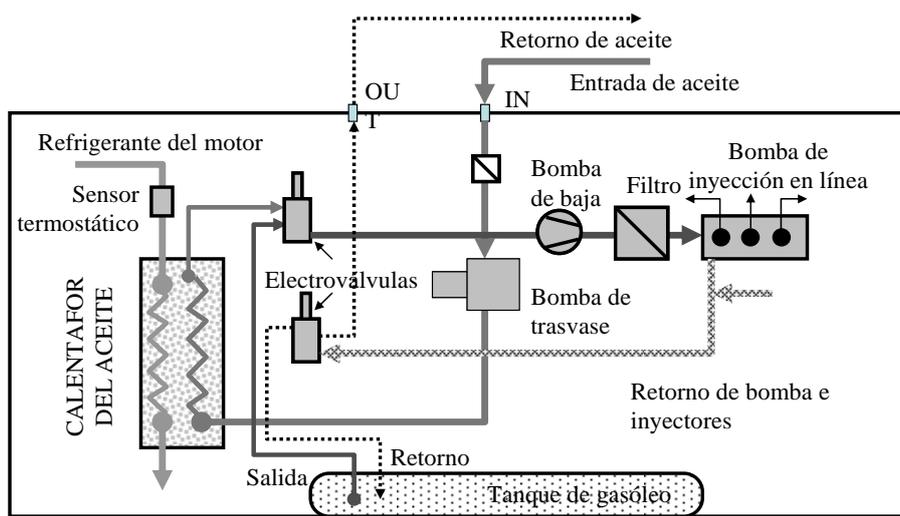


Figura 2: Esquema del circuito de combustible.

4.3. Sistema de carga eléctrica

Para probar el grupo electrógeno en condiciones de funcionamiento parecidas a las reales, se conectó a la salida del alternador, en cada una de las fases a 230 V, cargas eléctricas iguales (resistencias) en conexión en estrella. El ensayo se realizó fijando la potencia eléctrica en cada fase en cuatro condiciones de carga: carga nula, 1/3 de carga (3.600 W), 2/3 de carga (5.820 W) y 3/3 de carga 9.460 W, siempre con las tres fases equilibradas.

4.4. Instrumentación de medida

Al grupo electrógeno se le han acoplado, además de las resistencias de carga, un equipo de medida de emisiones y un caudalímetro en la línea de alimentación de aceite vegetal, antes de la T de reincorporación del aceite al circuito de alimentación del motor. Es un caudalímetro volumétrico de engranajes marca Bürkert 871 con un contador electrónico Type 8619 multiCELL.

La medida de consumo de aceite desde el depósito a través del caudalímetro oscilaba alrededor de un valor medio aunque el motor estuviera en condiciones estables de régimen y grado de carga.

Posiblemente esto es debido a la acción del regulador de velocidad, al sistema de calentamiento y filtrado interno, a las dilataciones de las tuberías y a posibles golpes de ariete. Por ello se realizó la medida de consumo a partir de las magnitudes de los equipos de análisis de gases y del caudalímetro de flujo de escape. Se comprobó que la diferencia del caudal de aceite medido por este procedimiento indirecto y el valor medio del caudalímetro Bürkert era inferior al 5 %. Además de esta manera se podía también medir el consumo de gasóleo cuando el motor usa este combustible. El caudal másico de combustible se obtiene del caudal de gases de escape y del valor del dosado absoluto (relación combustible / aire: F), que se calcula dividiendo la relación A/F estequiométrica que aparece en la tabla 1 por el valor de λ (relación aire / combustible relativa) medido por una sonda en los gases de escape, con lo que:

$$\dot{m}_f = \dot{m}_e \cdot \frac{F}{1 + F}$$

De la misma forma las emisiones de cada contaminantes X_i en caudal másico (kg/h) se obtienen de su concentración $[X_i]$ medida en el gas de escape y del caudal de gases de escape por la ecuación:

$$\dot{m}_i \text{ (kg/h)} = \dot{m}_e \text{ (kg/h)} \cdot [X_i] \cdot \frac{PM_i}{29}$$

Donde PM_i es el peso molecular del gas contaminante y 29 g/mol es el peso molecular medio de los gases de escape. Las emisiones específicas en g/kWh se obtienen dividiendo por la potencia eléctrica del grupo electrógeno en cada caso.

El rendimiento del motor η_{im} se ha calculado a partir de la potencia del motor (suponiendo un rendimiento eléctrico de alternador del 87% según los datos del fabricante del mismo), del consumo de combustible y del poder calorífico inferior en cada caso, por la ecuación

$$\eta_{im} = \frac{\text{Potencia motor (kW)}}{\dot{m}_f \cdot PCI \text{ (kJ/kg)}}$$

Las emisiones y el caudal de escape se midieron con el equipo MIVECO PEMS 2.0 desarrollado por el grupo de investigación del Laboratorio de Motores Térmicos [9]. Este equipo puede medir en tiempo real y registra las emisiones de CO, CO₂, HC y NO_x, al mismo tiempo que registra el valor de λ (relación aire/combustible relativa), el caudal y la temperatura del gas de escape. La toma de muestras se realizó con un conducto especial conectado a la salida del tubo de escape (tubo de toma de muestra) que se ve en la figura 3 y que incorpora el caudalímetro y las sondas de medida de algunos gases así como la toma de muestra para otros.



Figura 3. Tubo de toma de muestras instalado en el escape del grupo electrógeno.

El equipo de medida registra las emisiones y datos del escape en tiempo real cada 0,1 s, obteniéndose curvas como las de la figura 4.

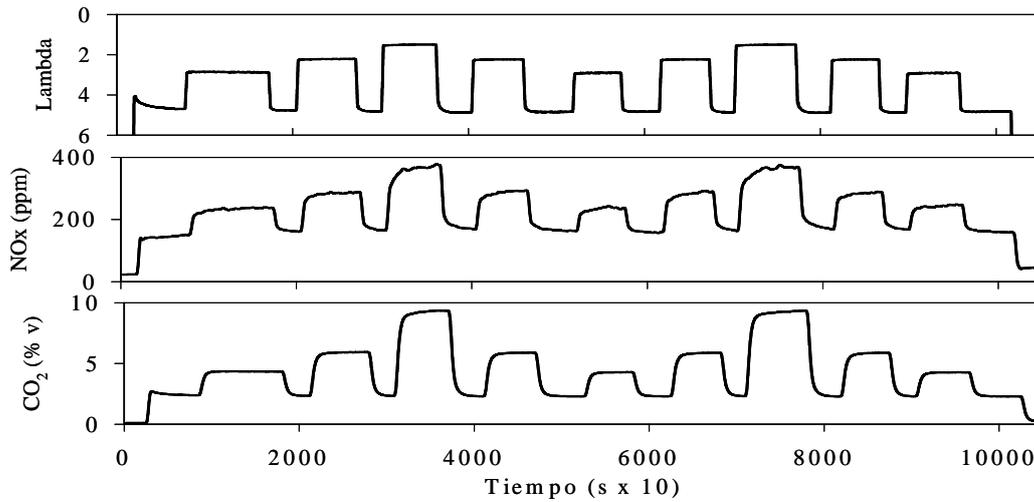


Figura 4. Ejemplo de resultados de emisiones

5. Resultados

A partir de las curvas anteriores se han promediado los datos registrados para cada grado de carga, eliminado algunos resultados fuera de rango y se han obtenido los valores de emisiones contaminantes en concentración en el escape y en g/kWh, y el consumo en consumo de combustible en l/h y g/kWh.

5.1. Emisiones

Los resultados de emisiones de CO₂, CO, HC y NO_x se muestran gráficamente en la Figura 5 comparados con gasóleo.

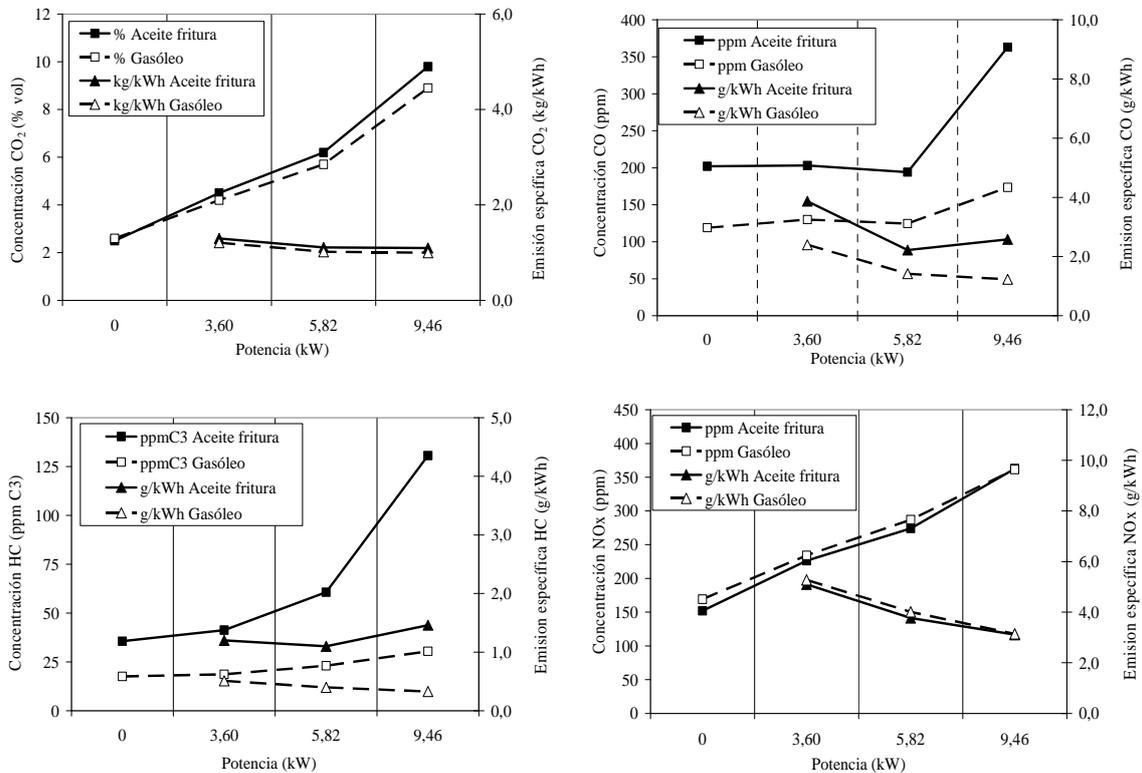


Figura 5: Emisiones de CO₂, CO, HC y NO_x con aceite de fritura y con gasóleo.

5.2. Consumo de combustible

La Tabla 2 muestra los resultados de caudal (l/h) y consumo específico (g/kWh) de combustible con aceite de fritura y con gasóleo en caudal y en la Figura 6 en forma gráfica comparativa.

Tabla 2: Resultados de consumo de combustible

ACEITE FRITURA			GASOLEO		
kW	l/h	g/kWh	kW	l/h	g/kWh
0	0,96	--	0	0,99	--
3,60	1,80	459	3,60	1,65	383
5,82	2,49	393	5,82	2,26	324
9,46	3,99	389	9,46	3,57	316

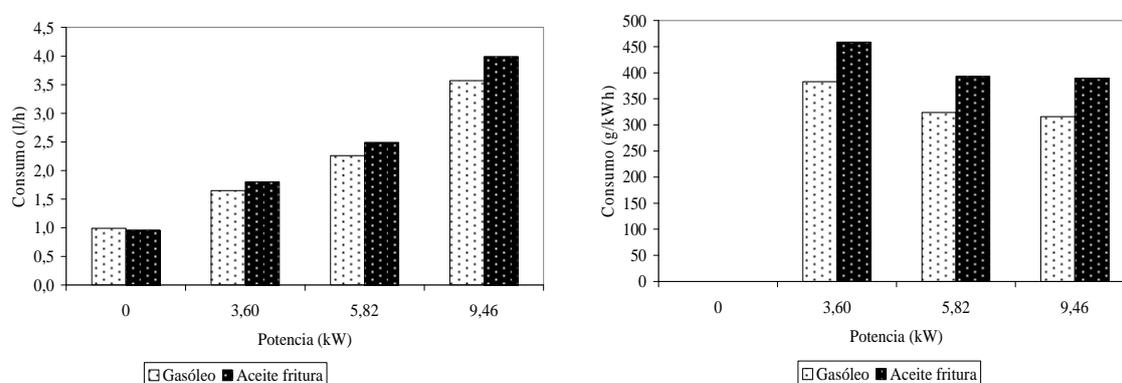


Figura 6: Consumo de combustible en l/h y en g/kWh.

El consumo de combustible en litros por hora aumenta aproximadamente un 10 % cuando se usa aceite de fritura frente a cuando se usa gasóleo. La razón es que cada litro de aceite vegetal contiene aproximadamente un 5 % menos de energía que el litro de gasóleo. Aunque tiene mayor densidad (aproximadamente un 9 % mayor) su poder calorífico es menor (aproximadamente un 13 % menor).

5.3. Rendimiento

Por otra parte, el rendimiento efectivo del motor es mayor con gasóleo posiblemente por la mejor pulverización y ajuste del motor para este combustible. La Tabla 3 muestra los resultados de rendimiento efectivo del motor calculados para cada combustible.

Tabla 3: Rendimiento efectivo del motor

kW eléctricos	Rendimiento efectivo del motor (%)	
	ACEITE FRITURA	GASÓLEO
3,60	20,9	21,7
5,82	24,4	25,7
9,46	24,6	26,4

6. Conclusiones

Las emisiones de CO₂ tanto en % en el gas de escape como en g/kWh son claramente menores con gasóleo, pero ya se ha explicado que este resultado no es significativo porque el aceite de fritura ya produjo una reducción de CO₂ en la atmósfera en su etapa de desarrollo vegetal.

Las emisiones de CO son significativamente mayores con el aceite de fritura. El mayor contenido en oxígeno del aceite de fritura hubiera explicado una menor emisión de CO. Sin embargo, este mayor valor obtenido muestra claramente que hay mayores problemas de evaporación y mezcla del aceite de fritura con el aire en las etapas del proceso de combustión.

Esto mismo explica las claramente mayores emisiones de HC cuando se usa aceite de fritura.

Sin embargo, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) son ligeramente menores con aceite de fritura. El mayor contenido de oxígeno en la formulación de los biocombustibles suele propiciar un aumento de las emisiones de NO_x [1], pero en este caso posiblemente por utilizarse un motor concebido para gasóleo, la mencionada menor calidad de la pulverización y mezcla durante la combustión, reduce las velocidades de la reacción y con ello la temperatura en la cámara de combustión. El menor rendimiento del motor corrobora esto. En todo caso la diferencia es muy poco significativa.

7. Agradecimientos

En memoria de Kenza Scalli.

8. Referencias

- [1] WORLDWATCH INSTITUTE. *Biofuels for Transport*. 2007. 452 p. (Ed. Earthscan).
- [2] HEYWOOD, J.B. *Internal Combustion Engines Fundamentals*. 1988 (Ed. Mc Graw Hill)
- [3] ALTON, R., CETINKAYA, S. y YÜCESU, H. S. *The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines*. Energy Conversion and Management vol. 42, 2001, pp. 529-538.
- [4] JONES, S. y PETERSON, C. L. *Using Unmodified Vegetable Oils as a Diesel Fuel Extender –A Literature Review*. [en línea]. Disponible en http://journeytoforever.org/biofuel_library/idahovegoilslitreview.pdf [Consulta octubre 2013)
- [5] ELSBETT, G. “Engines running on pure vegetable oil as regrowing fuel History, Development, Experience, Chances”. Presentación al *Shanghai International Symposium on I.C. Engines*. 2003
- [6] CEDEÑO, F. O. y PRIETO, M. *Estudio de la densidad y de la viscosidad de algunos ácidos grasos puro*. Grasas y Aceites, vol. 50, fase 5, 1999, pp.359-368.
- [7] NWAFOR, O. M. I. *Emission characteristics of diesel engine running on vegetable oil with elevated fuel inlet temperature*. Biomass and Bioenergy vol. 27, 2004, pp. 507-511.

- [8] GRABOSKI M. S. y MCCORMICK, R.L. *Combustion of Fat and Vegetable Oil Derived Fuels in Diesel Engines*. Energy Combust. Sci. vol. 24, 1998, pp. 125-164.
- [9] FONSECA, N. y CASANOVA, J. “Problemas asociados a la medida de emisiones másicas instantáneas en motores de vehículos”. En *Actas de las VI Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica*. Córdoba, 2009