

Comportamiento de emulsiones provenientes de un cultivo de *Chlorella vulgaris* en un banco de motores

Behavior of fuel emulsions from *Chlorella vulgaris* on engine test bench

David Guillermo Fernández Rodríguez^{1,*}

¹Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (Cujae). Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.

*Correspondencia: renia@tesla.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Resumen

La matriz energética cubana se basa principalmente en el consumo de combustibles fósiles, los cuales son recursos no renovables y altos contaminantes. En la actualidad se buscan soluciones en biocombustibles, a partir de biomasa de microalgas de la especie *Chlorella vulgaris*. El líquido remanente de este cultivo se desecha generando así contaminación. Producto de las propiedades del líquido remanente del cultivo de microalgas *Chlorella vulgaris*, este puede emplearse para emulsionar con combustible diesel. En el presente trabajo se formuló una emulsión empleando diesel en un 94%, el tensoactivo Nonil fenol+8MOE y un 6% de líquido remanente del cultivo. Un 6% de agua en la emulsión formulada garantiza una viscosidad dinámica de 5,7 mPa·s, semejante al combustible diesel. Las pruebas de banco se realizaron en un motor diesel Petter modelo PH1W, un analizador de gases Testo 350 XL y una balanza digital Sartorius. Las prestaciones del motor disminuyen de forma general pero a medida que aumenta el régimen de carga el comportamiento de ambos es similar. La carga contaminante en las emisiones se redujo para el NOx un 32%, CO en un 42% y para HC en un 25% en comparación con el combustible diesel. El costo de generar 1 kW·h fue de 0,40 CUC.

Palabras clave: Biocombustibles, microalgas, combustible diesel, emulsión, tensoactivo, emisiones

Abstract

The Cuban energy mix is based mainly on the consumption of fossil fuels which are not renewable resources and high pollutants. At the present time, solutions are under study for biofuels starting from microalgae biomass, especially from *Chlorella vulgaris*. The remaining liquid of this algae culture is discarded contributing this way to the pollution. Due to the properties of the remainder liquid of the culture of *Chlorella vulgaris*, it is emulsified with standard diesel fuel and further engine test at a bench; in order to analyze it influences on the engine and the exhaust emissions and compare with diesel fuel. The emulsion was formulated by using diesel fuel at 94%, surfactant Nonil fenol+8MOE and 6% of remainder liquid of algae culture. A 6% of water in the formulated emulsion assures a dynamic viscosity of 5.7 mPa·s, near to diesel fuel. The engine bench tests were developed on a diesel engine model Petter PH1W, a gas analyzer Testo 350 XL and a digital scale Sartorius. The benefits to the engine diminished in a general way but as the load regime was increased, the behavior of closer to diesel fuel. The

polluting load of the emissions decreased in NO_x 32%, CO 42% and HC 25% in comparison with diesel fuel. The cost of generating 1 kW·h is of 0.40 CUC.

Keywords: biofuels, microalgae, diesel fuel, emulsion, surfactant, performance, emissions

1. Introducción

El consumo energético mundial es cada día mayor y la creciente crisis energética que afronta el mundo se debe principalmente a que la fuente fundamental de extracción son los combustibles fósiles, que además de ser altos contaminantes, son recursos energéticos no renovables. En la actualidad, el uso continuo y desmedido de estos ha influido grandemente en la disminución de las reservas.

Las fuentes renovables de energía son recursos inagotables que por su cantidad ilimitada o su capacidad de regenerarse de manera natural no suponen un peligro para la naturaleza y pueden ser empleados. La energía extraída de renovables puede ser obtenida de varias maneras dependiendo de la materia prima de la que provenga.

Los biocombustibles son recursos renovables que pueden ser utilizados en la obtención de energía. Dentro de los combustibles alternativos se incluyen la biomasa, los aceites vegetales y grasas animales, los derivados de ambos, los bio-alcoholes, el dihidrógeno y el biogás. Los biocombustibles que más atención reciben en el mundo en cuanto al desarrollo de su tecnología de producción y uso en motores de combustión interna (MCI) son el etanol como sustituto de la gasolina, los aceites vegetales y el biodiesel (BD) como alternativa al combustible diesel [1,2].

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos y los más eficientes conversores de energía solar debido a su sencilla estructura celular. Al estar suspendidas en agua tienen mejor acceso al CO₂ y otros nutrientes para su crecimiento logrando así duplicar su biomasa entre 3 y 4 días en condiciones óptimas. Por estas razones las microalgas son, sin duda, una solución latente para la crisis energética mundial, pero esta solución viene ligada al problema de su cultivo y producción [3].

En sentido general, la tecnología de uso de microalgas es costosa y compleja en cuanto a la extracción y purificación de los biocombustibles. Sin embargo, hay una tendencia al uso de los subproductos que de esta tecnología se derivan con el fin de abaratar costos. Tal es el caso del uso de las emulsiones del tipo agua en aceite, utilizando combustible diesel como medio de dispersión y el líquido remanente del cultivo de las microalgas como fase dispersa [4-6].

Uno de los problemas asociados al cultivo de microalgas con el fin de obtener biocombustibles es el manejo de los residuales del proceso, pues el líquido remanente del cultivo se desecha incrementando así los gastos y contribuyendo a la contaminación del medio ambiente. El cultivo de microalgas contiene pequeñas porciones de biomasa, además de minerales lo que resulta de interés para el uso como emulsionante de combustible diesel con el fin de reducir la carga contaminante y aumentar la eficiencia. Considerando las características del cultivo, se propone emulsionar con diesel y realizar un estudio de su comportamiento en un banco de motores así como una comparación con el combustible de referencia.

2. Materiales y Métodos

Las emulsiones se preparan añadiendo los diferentes componentes en el siguiente orden: Primeramente el combustible diesel, a continuación el tensoactivo (Nonil fenol+ 8 MOE) y finalmente el cultivo de microalgas *Chlorella vulgaris*, completando el volumen requerido para el estudio.

La agitación se realiza mecánicamente mediante el agitador sónico Soniprep-120, con una intensidad de agitación de 14 Hz. Esta técnica de vibración ultrasónica, es muy utilizada para preparar pequeñas partículas en una solución a alta velocidad y muy eficientemente, con un considerable ahorro de energía. Primeramente se disuelve un 2% de tensoactivo en combustible diésel y posteriormente se añade el volumen de agua de 6%. La agitación se logra mediante el agitador sónico Soniprep-120. El volumen a preparar es de 400 mL con una frecuencia de 14 Hz durante 10 minutos. Se mide la viscosidad dinámica de la emulsión para determinar si esta cumple con los requerimientos necesarios para ser utilizada como combustible en un motor diesel.

La viscosidad dinámica (μ) de la emulsión se mide utilizando un viscosímetro RION VT 03-F. Este equipo consiste en dos cilindros concéntricos unidos al mecanismo de medición. La emulsión se preparó como sistema ternario utilizando combustible diesel regular, agua y un tensoactivo con el fin de evaluar su capacidad de estabilización para la obtención del sistema disperso estable del tipo w/o. Las características del agua utilizada se muestran en la Tabla 1. Las mediciones y determinaciones, se realizaron con base en las técnicas de análisis establecidas.

Tabla 1. Características del medio acuoso empleado

Parámetro	Valor
pH	7
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1
Dureza total (ppm)	< 1
Densidad (g/cm^3)	0,998
Viscosidad cinemática (mm^2/sec)	0,658

El tensoactivo usado para la estabilización del sistema disperso fue Nonil fenol+8MOE. Este surfactante presenta 8 unidades de óxido de etileno (+8 MOE) y un peso molecular (PM) = 572. Está constituido por una mezcla de 38,45% de nonil fenol y 61,55% de óxido de etileno.

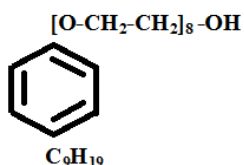


Fig.1 Estructura química del surfactante usado

Para la elaboración del medio de cultivo se utilizaron los nutrientes descritos en la Tabla 2, tomando como referencia el medio Watanabe.

Tabla 2. Nutrientes utilizados en la preparación del medio de cultivo

Nombre sistemático (IUPAC)	Fórmula	Masa molar (g/mol)	Cantidad (g/L)
Cloruro de potasio	KCl	74,55	0,25
Sulfato de magnesio heptahidratado	MgSO ₄ .7H ₂ O	246,51	0,55
Nitrato de calcio tetrahidratado	Ca(NO ₃) ₂ .4 H ₂ O	236,81	1,00
Sulfato de hierro (II) heptahidratado	FeSO ₄ .7H ₂ O	278,05	0,02
Dihidrógeno fosfato de potasio	KH ₂ PO ₄	136,09	0,26

El motor utilizado en las pruebas en banco fue un motor diesel Petter monocilíndrico de inyección directa. La Tabla 3 recoge las características técnicas principales del motor.

Con el objetivo de medir la presión en la cámara de combustión se utilizó en el cilindro un sensor piezoeléctrico Kistler de presión (tipo 6067C). Según criterios de investigadores como Payri [7], este tipo de sensor debido a que está compuesto por un cristal de cuarzo (los cuales tiene la propiedad de cargarse eléctricamente al ser sometidos a presión), permite medir variaciones de presiones relativas, presenta una adecuada sensibilidad, una alta linealidad, un rango dinámico elevado, así como una temperatura máxima de trabajo de 350°C. Además, son adecuados para procesos donde se presenten altas frecuencias, así como cargas térmicas y dinámicas elevadas (por ejemplo: durante la combustión y en las líneas de inyección).

El sistema de adquisición de datos está compuesto por dos sensores de presión Kistler 4075A y Kistler 4067A, un sensor de presión piezoeléctrico Kistler 6067C1, dos amplificadores uno Kistler 5064 y el otro Kistler 4665 (piezoresistivo), un multiplicador de pulso, un codificador mecánico Kistler 2614A1, un codificador electrónico Kistler 2614A2, un chasis National Instruments DAQ-9174, dos módulos NI 9215-BNC y NI 9401 y una celda de torque. Para la evaluación en el banco se fijó una velocidad de 1500 rpm a 15, 20, 25 y 30 Nm. Los resultados de todos los experimentos realizados se compararon con los obtenidos con el combustible diesel.

Por medio de una celda Torque se fijaron los regímenes de carga, tomando 4 con valores precisos de 15 Nm, 20 Nm, 25 Nm y 30 Nm respectivamente y la velocidad angular en 1500 rpm como sugiere el manual del motor.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del motor Petter PH1W

Elemento	Valor
Cantidad de cilindros	1
Cilindrada	0,659 L
Relación de compresión	16,5:1
Sincronización de la inyección de combustible	24° antes PMS (hasta 1 650 rpm) 28° antes TDC (1 651-2 00 rpm)
Carrera	0,110 m
Diámetro del Cilindro	0,0873 m
Tipo de enfriamiento	Enfriado por agua

Con el objetivo de conocer la influencia de la carga y del combustible empleado en el Retardo de Ignición se realizó un Diseño Factorial Aleatorio Simple utilizando el software Statgraphics Centurion XV.II. Este análisis tiene entre sus niveles los extremos carga de 15 y 30 Nm y combustible diésel y emulsión, con 1 réplica en cada caso.

Tabla 4. Diagrama Factorial del Diseño de experimentos

	Bloque	Carga	Combustible
Pruebas	1	1	-1
	1	-1	-1
	1	-1	1
	1	1	1
Réplicas	2	1	-1
	2	-1	-1
	2	-1	1
	2	1	1

La velocidad de liberación del calor (ROHR) es calculada a partir de los valores de primera derivada del volumen y la primera derivada de la presión, en cada ángulo de giro del cigüeñal desde el comienzo de la inyección.

3. Resultados y Discusión

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de bancos de motores diésel, se analizaron las curvas de presión, incremento de presión y razón de calor liberado para los combustibles diésel y la emulsión. Los valores de presión dentro de la cámara de combustión y en la línea de suministro de combustible a alta presión del motor se obtuvieron para cada uno de los combustibles probados en el motor. En la Figura 2 se observa que en los ensayos realizados en el motor, la emulsión alcanza los menores valores de presión en la cámara de combustión comparados con el combustible diésel para 15 Nm. Este comportamiento se observó en todos los ensayos realizados excepto en el régimen de 30 Nm, donde la emulsión alcanza los mayores valores como se muestra en la Figura 3.

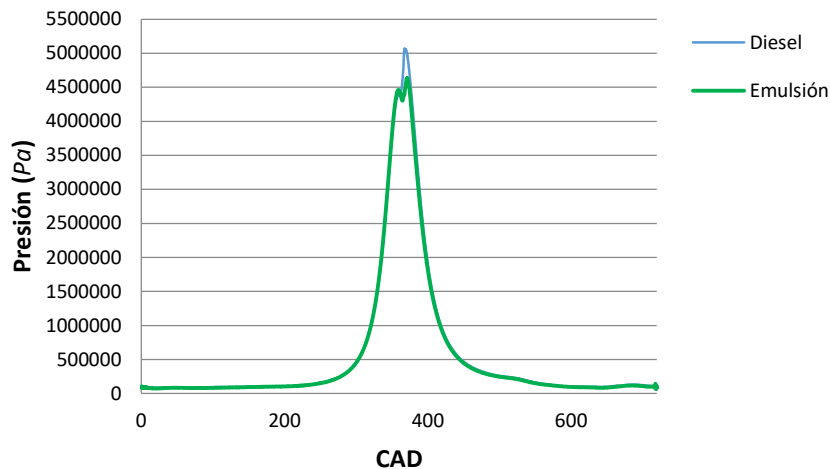


Fig.2 Curva de presión en el cilindro contra ángulo de giro a 15 Nm y 1500 rpm

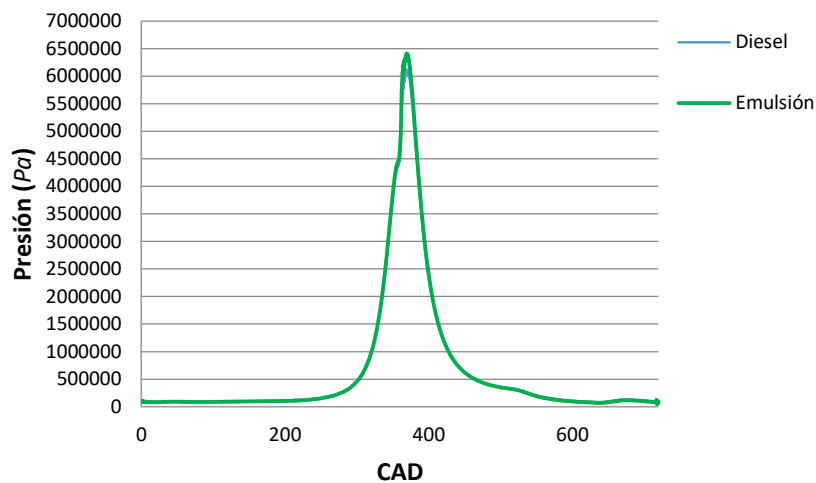


Fig.3 Curva de presión en el cilindro contra ángulo de giro a 30 Nm y 1500 rpm

La primera derivada de la presión tiende a tener un comportamiento más sensible que la presión por lo que para el análisis de esta variable es importante hacer énfasis en su comportamiento.

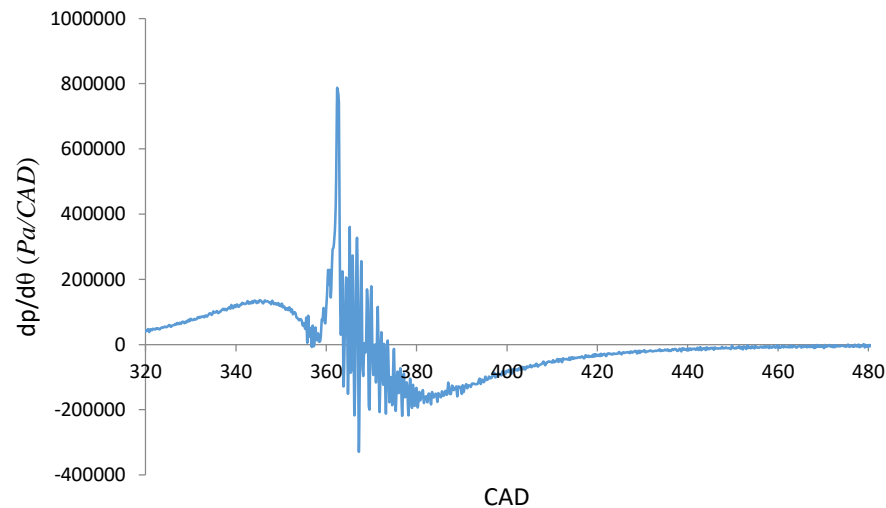


Fig.4 Primera derivada de la presión contra ángulo de giro a 25 Nm y 1500 rpm (combustible diesel)

En las Figuras 4 y 5 se puede apreciar que el combustible diesel tiene los mayores valores de razón de cambio mientras la emulsión no sólo posee los menores sino además se aprecia un evidente retraso en su cambio de comportamiento comparado con el diesel.

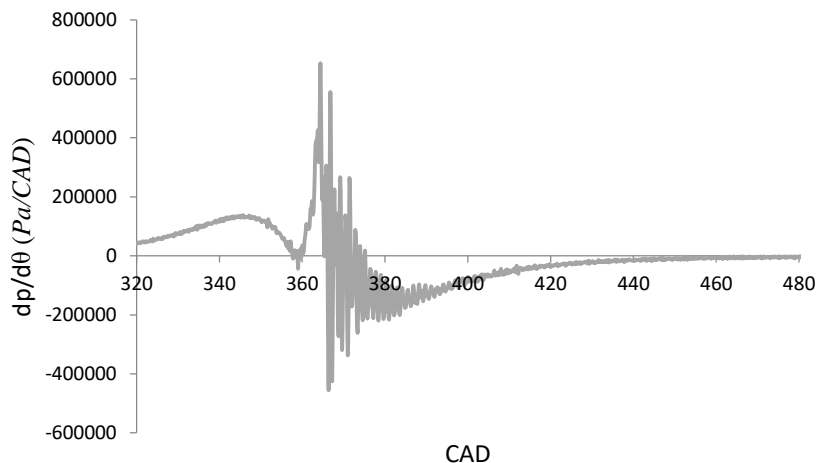


Fig.5 Primera derivada de la presión contra ángulo de giro a 25 Nm y 1500 rpm (emulsión)

Con respecto a la Razón de Calor Liberado (ROHR), a partir de los resultados obtenidos de ROHR de la emulsión en comparación con el combustible diesel a 1500 rpm, se evidencia un inicio tardío del proceso de liberación de calor para la emulsión en comparación con el combustible diesel en cada condición. Este comportamiento está relacionado, con una mejor mezcla del combustible diesel con el aire antes de que ocurra el proceso de combustión. El valor de viscosidad más bajo en el diesel permite una mejor atomización por consiguiente una mejor mezcla con el aire dentro de la cámara de

combustión. Sin embargo este comportamiento cambia a medida que aumenta el torque, incluso hasta invertirse.

Los resultados de las mediciones de presión en el cilindro permitieron determinar el período de retardo de la ignición mediante la primera derivada la primera derivada ($dP/d\theta$) de la presión en el cilindro. Un retraso del inicio de combustión fue observado para cada estado del motor cuando la emulsión fue usada. El análisis del retardo de ignición se realizó tomando en cuenta el aumento de los valores de presión y el momento de inyección del combustible [8-11]. Es decir, se determinaron los dos ángulos cuando ocurrieron los procesos y se obtuvo la diferencia entre ellos. El ángulo de inicio de la inyección es un valor fijo de 336° .

La tendencia observada en el comportamiento del retardo de la ignición cuando se probaron los combustibles puede ser debido a que el uso de la emulsión tiende a bajar la temperatura de combustión y por tanto temperaturas más bajas pueden conducir a aumentar el retardo de la ignición. Además, es de destacar la diferencia de viscosidades cinemáticas que existe entre la emulsión y el intervalo recomendado por el fabricante del motor Petter. Se puede apreciar que el comportamiento del Retardo de Ignición para los combustibles disminuye a medida que aumenta el torque siendo siempre los valores de la emulsión mayores que los del diesel. Los resultados obtenidos se corresponden a los reportados por diferentes investigadores como Melo, Bedford, Subramanian y Alahmer [12-14].

Se determinó estudiar el RI y la influencia de la carga y el combustible en su comportamiento pues, el RI es uno de los parámetros más importantes ya que afecta todas las prestaciones del motor y las emisiones. Para esto se diseñó un modelo 2^2 con dos variables y a dos niveles siendo estos el combustible emulsión y el diesel, y la carga a 15 Nm y 30 Nm codificados como 1 y -1 respectivamente.

Con el objetivo de contabilizar la cantidad de combustible que el motor consumió durante cada prueba se midió el consumo horario. Para esto se utilizó una balanza que midió la masa de combustible antes y después de finalizado cada ensayo. Además, se utilizó un cronómetro para medir el tiempo de duración de la prueba que se fijó a 5 minutos. De esta forma se pudo determinar cuántos kilogramos de combustible se consumieron cada hora. Esta tendencia por lo general, es referida en los reportes de Lin y Abu-Zaid [15,16].

El resultado de que el CEC disminuya junto a un incremento del torque está dado por el hecho de que la presión efectiva y la eficiencia mecánica aumentan a medida que lo hace la carga. El hecho de que el CEC de la emulsión sea mayor que el diesel es porque el poder calórico de la emulsión es menor que el del diesel en un 5%, lo cual incrementa el consumo de combustible para el mismo valor de torque. La absorción parcial del calor liberado de la combustión por el calor latente del agua en la emulsión también disminuye el rendimiento y requiere mayor cantidad de combustible emulsionado que de diesel.

La presión y la temperatura en la cámara de combustión son dos factores que pueden provocar la microexplosión, esto puede facilitar el proceso de quema de combustible y disminuir el CEC de la emulsión a medida que aumenta el torque. La reducción del CEC de la emulsión puede ser atribuida a la formación de finas gotas que rápidamente se evaporan aumentando el RI, resultando así una mayor quema de combustible en la combustión prematura y en una disminución en la temperatura media del cilindro.

El 6% de agua en el combustible emulsionado influye en la tendencia a aumentar la eficiencia térmica esto pudiera ser debido a el fenómeno de la microexplosión, ya que la diferencia de volatilidad entre el agua y el diesel incrementa la mezcla aire-combustible y aumenta la eficiencia de la combustión. La presencia del agua influye positivamente en la atomización durante la inyección lo cual incrementa

significativamente la eficiencia. En el caso de la emulsión, el agua introducida tiene un efecto significativo en la combustión. Esta es la razón por la que es menor la eficiencia a bajas cargas.

El 6% de agua en el combustible emulsionado influye en la tendencia a aumentar la eficiencia térmica; esto pudiera ser debido al fenómeno de la microexplosión, ya que la diferencia de volatilidad entre el agua y el diesel incrementa la mezcla aire-combustible y aumenta la eficiencia de la combustión. La presencia del agua influye positivamente en la atomización durante la inyección lo cual incrementa significativamente la eficiencia. En el caso de la emulsión, el agua introducida tiene un efecto significativo en la combustión. Esta es la razón por la que es menor la eficiencia a bajas cargas.

Con respecto a las emisiones, los resultados obtenidos fueron los siguientes: las emisiones de NO_x disminuyeron en un 32%, las de CO disminuyeron en un 42% y las de HC disminuyeron en un 25% excepto para el régimen de 15 Nm que tuvieron un comportamiento inverso.

4. Conclusiones

El tiempo de retardo de ignición de la emulsión fue mayor que el del combustible diesel con tendencia disminuir ambos; no obstante el diseño factorial realizado reveló que el aumento de la carga tiene una influencia negativa mayor que la positiva del cambio de combustible para el tiempo de retardo de ignición. La carga contaminante de las emisiones producto de una combustión más completa de la emulsión se redujo para el NO_x un 32%, para CO un 42% y para HC disminuyeron un 25% en comparación con el diesel. El análisis económico realizado expuso que el costo de producción del combustible emulsionado es mayor que el del diesel, sin embargo el aumento en algunas prestaciones y la reducción de la carga contaminante lo hacen una propuesta medioambiental. El combustible emulsionado a partir del cultivo de microalgas *Chlorella vulgaris* usado en motores diesel reduce a carga contaminante sin pérdidas significativas en las prestaciones del motor.

Referencias

1. Colectivo de Autores, *Biocombustibles para su uso en motores diesel*, 2014. Ed. IDICT: La Habana. ISBN: 978-959-234-095-4.
2. Demirbas, A., Demirbas, M.F., *Algae Energy*, 2010. Springer: London. ISBN: 978-1-84996-049-6.
3. Arvelo-Álvarez, R., *Viabilidad de producción de biodiesel a partir de cultivos energéticos de microalgas*, 2011.
4. Fernández, A., *Preparación, caracterización y estabilización de emulsiones y microemulsiones o/w*, 2006. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Granada.
5. Mura, E., Josset, P.M.C., Loubar, K., Bellettre, J., *Study of the micro-explosion temperature of water in oil emulsion droplets during the Leidenfrost effect*. Exp. Therm. Fluid Sci., 2012. **43**: p. 63-70.
6. Ghojel, J., *Performance, emissions and heat release characteristics of direct injection Diesel engine operating on Diesel oil emulsion*. Applied Thermal Engineering, 2006: p. 2132-2141.
7. Payri, F., *Motores de combustión interna alternativos*, 2011. Barcelona: Ed. Reverté.
8. Piloto, R., Ferrer, N., Ferrer, N., *Evaluación del desempeño de un motor Yuchai trabajando con biodiesel cubano*. Ingeniería Energética, 2010. **31**: p. 70-79.
9. Piloto, R., *Determinación de la influencia en el funcionamiento de motores diesel del uso de biodiesel*. Tesis de Doctorado, 2010. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.
10. Assanis, D.N., Filipi, Z.S., Fiveland, S., Symiris, M., *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. **125**(2): p. 450-457.

11. Piloto-Rodríguez, R., Sierens, R., Verhelst, S., *Ignition delay in a palm oil and rapeseed oil biodiesel fuelled engine and predictive correlations for the ignition delay*. Fuel, 2011. **90**(2): p. 766-772.
12. Bedford, F., *Effects of Direct Water Injection on DI Diesel Engine Combustion*. SAE Technical Papers, 2000: p. 1-10.
13. Subramanian, K., *A comparison of water-Diesel emulsion and timed injection of water into the intake manifold of a Diesel engine for simultaneous control of NO and smoke emissions*. Energy Conversion and Management, 2011: p. 849-857.
14. Alahmer, A., *Engine performance using emulsified Diesel fuel*. Energy Conversion and Management, 2010: p. 1708-1713.
15. Lin, C., *Engine performance and emission characteristics of three-phase Diesel emulsions prepared by an ultrasonic emulsification method*. Fuel, 2006: p. 593-600.
16. Abu-Zaid, M., *Performance of single cylinder, direct injection Diesel engine using water fuel emulsions*. Energy Conversion and Management, 2004: p. 697-705.