

Evaluación del proceso de combustión de una mezcla de biodiesel de *Moringa oleífera* y combustible diesel

Assessment of the combustion process of blends of *Moringa oleífera* biodiesel and diesel fuel

Iradis Alfonso Bacallao^{1,*}

¹Facultad de Ingeniería Química. 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

En el presente trabajo se desarrolló una prueba de banco a una mezcla de biodiesel de *Moringa oleífera* al 10% con combustible diesel. A partir del perfil de ácidos grasos y utilizando RNA se obtuvo que el NC de los ésteres metílicos es de 57,30. Los resultados obtenidos son cercanos a estudios realizados donde se reportan valores de NC. El valor de viscosidad encontrado para la mezcla B10 a 40°C fue de 3,28 mm²/s, valor que se encuentra en correspondencia con lo reportado en la literatura. Se observa un incremento ligero en la presión máxima en la cámara de combustión cuando se está usando B10. Este incremento de presión es de 7%. Se observa que la combustión comienza antes para B10 en estas condiciones. Este cambio no es numéricamente alto pues está en el orden de 3° pero ello es suficiente para que ejerza influencia en las prestaciones del motor, emisiones y calor liberado. Se pudo constatar un incremento considerable de las emisiones de NOx, superiores a las previamente reportadas para este tipo de biodiesel.

Palabras clave: Biocombustibles, biodiesel, diesel, *Moringa oleífera*

Abstract

An engine test bench was developed, corresponding to biodiesel of 10% of *Moringa oleífera* and diesel fuel. From the fatty acids profile and by using ANN was estimated the cetane number of the biodiesel fuel of 57.30. The obtained results are close to the reported values for NC. The viscosity found for the B10 blend at 40°C was of 3.28 mm²/s, in agreement with those found in literature. A slight increase of maximum in-cylinder pressure was observed when B10 was used. This pressure increase was near 7%. An earliest start of combustion was also observed for the working conditions. The registered values were not quite different compared to diesel fuel, with a difference in the order of 3°, but enough to have a strong influence on engine performance, exhaust emissions and heat released. A significant increase of exhaust NOx was observed, highly superior to the literature reports corresponding to similar biodiesel source and experimental conditions.

Keywords: Biofuels, biodiesel, diesel, *Moringa oleífera*

1. Introducción

Durante décadas los combustibles fósiles han sido la principal fuente de energía a nivel mundial debido a su relativamente alto contenido energético, propiedades de combustión y disponibilidad inmediata. Diferentes modelos estiman que está cerca o ya se ha alcanzado el pico de producción de petróleo y que se avizora el agotamiento paulatino de las reservas existentes, lo que trae consigo el aumento del precio del crudo. Este combustible fósil provoca contaminación ambiental generando contaminantes tóxicos que contribuyen al efecto invernadero, al calentamiento global, al cambio climático e incluso a la aparición de problemas sanitarios [1]. Los sectores de mayor consumo de derivados del petróleo son el transporte y la maquinaria. Las emisiones han aumentado sustancialmente debido al rápido crecimiento de la industria del transporte. Muchos investigadores han estado desarrollando nuevas fuentes de energía alternativas que estén disponibles, técnicamente factibles, económicamente viables y ambientalmente aceptables.

El biocombustible es una alternativa factible y limpia, una fuente de energía que no contiene ninguna sustancia nociva y produce menos emisiones contaminantes que el combustible diesel. El biodiesel es una alternativa de sustitución global o parcial de los combustibles tipo diesel y su uso reduce las emisiones de gases contaminantes sin realizar modificaciones en los vehículos [2-4].

El biodiesel se considera una opción atractiva para reducir el uso de los combustibles derivados del petróleo (diesel específicamente). Este biocombustible se produce a partir de fuentes renovables como aceites vegetales por lo que produce una ventaja neta en lo que se refiere al ciclo de carbono, no produciendo acumulación del mismo en el medio ambiente. Entre las plantas oleaginosas a partir de las cuales se puede extraer aceite de calidad para la obtención de biocombustibles se encuentran: la soya, el girasol, la palma, el coco, la colza, entre otras. Existen otras fuentes de obtención de biodiesel como los aceites de fritura usados o grasas animales, aunque cualquier materia que tenga triglicéridos puede utilizarse para la producción del portador energético. La utilización del biodiesel ofrece múltiples ventajas, tales como: disponibilidad, regeneración, bajo contenidos de sulfuros, alto contenido calórico y biodegradabilidad [5-7].

En los últimos tiempos se ha venido incrementado el cultivo de la *Moringa oleífera* en regiones tropicales y subtropicales. El estudio de la planta de *Moringa oleífera*, es de gran importancia, pues es una de las especies vegetales con mayor contenido de aceite en sus semillas (30-45%) [8]. El biodiesel que se obtiene a partir del aceite extraído de las semillas de *Moringa oleífera* presenta propiedades similares a las del diesel por lo que puede ser usado en los motores de encendido por compresión sin mezclarlo con diesel, pero mezclado se obtienen mejores resultados.

Se prevé un incremento del consumo de la energía en Cuba en un futuro próximo y las reservas de crudo disminuyen, por lo que es recomendable una proyección en la cual se articulen no solo las fuentes convencionales de energía, sino también la integración de las fuentes renovables. El biodiesel a partir de *Moringa oleífera* es un tema actual objeto de varias investigaciones en las cuáles se trabaja utilizando el biocombustible puro o mezclado con diesel. Teniendo en cuenta que con las mezclas se obtienen mejores resultados, el objetivo del presente trabajo es evaluar el proceso de combustión de un motor de encendido por compresión funcionando con una mezcla de biodiesel de *Moringa oleífera* y diesel al 10%.

2. Materiales y Métodos

Para la realización de la prueba en Banco de Motores se utilizan como materia prima diesel y ésteres metílicos. Estos últimos fueron obtenidos a escala de laboratorio en la Facultad de Ingeniería Química a partir de aceite extraído de semillas de *Moringa oleífera* variedad Criolla. El diesel usado fue comprado en CUPET.

Para la determinación de la composición de ácidos grasos se utiliza un cromatógrafo de gases (Agilent Technologies 6890N (G1530N), Network GC System con una columna cromatográfica SP de 100 m; sistema de inyección por enfriamiento en columna y 1 mL/min de He como gas portador. El detector usado es el detector de ionización por llama, operado a 250°C, 300 mL aire/min y 30 mL H₂/min. Gas portador: He 20 mL/min. Programa de temperatura: 100°C (1 min), 4,8°C/min-150°C, 1°C/min, 170°C (48 min), 1°C/min, 174°C (30 min), 5°C/min, 240°C (10min). Los ácidos grasos fueron identificados por comparación del tiempo de retención y su espectro de masas con una base de datos de espectros de masas de compuestos conocidos. En la Tabla 1 se muestra la composición de ácidos grasos de las semillas de *Moringa oleífera*. El número de cetano del biodiesel se determina usando los modelos del método de redes neuronales artificiales (RNA) (CGD (11:4:1)) [8-10].

La mezcla de diesel con los ésteres metílicos se preparó usando un vaso de precipitado de 5 L de volumen. Se mezcló con una proporción en volumen de 10% de biodiesel y 90% de diesel para obtener 3 L de mezcla, se agitó con un agitador de forma manual durante aproximadamente 15 minutos a temperatura ambiente. De esta manera se obtuvo una mezcla B10 que se usó para realizar las pruebas en Banco de Motores. En la literatura [7,11] se reportan pruebas realizadas con biodiesel de *Moringa oleífera* mezclado con diesel a esta proporción de volumen (B10).

La investigación experimental se llevó a cabo utilizando combustible diesel (B0) y la mezcla B10. Durante la realización de los experimentos en el Banco de Motores, para estudiar los fenómenos en la cámara de combustión, las condiciones ambientales experimentales de referencia son: la temperatura ambiente se mantuvo en 26°C, la presión atmosférica entre 1001 hPa y 1004 hPa, y la humedad relativa alrededor del 70%. Para analizar el comportamiento de los combustibles en la cámara de combustión se utilizó un motor diesel Lister-Petter PH1W. Los experimentos en el Banco de Motores se desarrollaron bajo las siguientes condiciones que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Composición de ácidos grasos del aceite de *Moringa oleífera*

Ácido graso	Composición (%)
C12:0 (láurico)	0,06±0,046
C14:0 (mirístico)	0,08±0,023
C15:0 (pentadecanoico)	0,03±0,009
C16:0 (palmítico)	7,43±0,212
C16:1 (palmitoléico)	1,50±0,024
C17:0 (margárico)	0,15±0,021
C18:0 (esteárico)	4,01±0,158
C18:1 (10-octadecenoico)	0,44±0,072
C18:1 (oleico, 9- octadecenoico)	73,09±0,337
C18:2 (linoléico)	0,95±0,014
C18:3 (linolénico)	0,19±0,011
C20:0 (araquídico)	2,48±0,033
C20:1 (gondoico)	2,39±0,022
C21:0 (heneicosanoico)	0,13±0,004
C22:0 (behénico)	5,84±0,256
C22:1 (erúcico)	0,13±0,001
C23:0 (tricosanoico)	0,08±0,007
C24:0 (lignocérico)	0,87±0,007
C25:0 (hiénico)	0,03±0,010
C26:0 (cerótico)	0,06±0,019
C27:0 (carbocérico)	0,03±0,000
C28:0 (montánico)	0,03±0,006
Total Saturados	21,30±0,290
Total Insaturados	78,69±0,288

Tabla 2. Condiciones de operación del motor

Parámetro	Valor
Potencia efectiva (kW)	15-17
Trabajo indicado	305-353
Torque (Nm)	103
Frecuencia (rpm)	1468-1504

3. Resultados y Discusión

A partir del perfil de ácidos grasos y utilizando RNA se obtuvo que el NC de los ésteres metílicos es de 57,30. Los resultados obtenidos son cercanos a estudios realizados donde se reportan valores de NC de 56,3 [2,11], 67,07 [1], 62,12 y 63 [8]. Las diferencias con estos últimos se fundamentan en los métodos empleados para la medición. El NC depende básicamente de la composición química del combustible analizado y del aceite vegetal del que proviene. El NC del biodiesel depende del aceite vegetal del que proviene. El NC aumenta a medida que las cadenas de los ácidos grasos son más largas (con un mayor número de átomos de carbono) y varía según el grado de insaturación. A medida que incrementa el grado de insaturación decrece el NC. El NC del biodiesel que se obtiene a partir del aceite de *Moringa oleífera* es elevado debido a que se obtiene a partir de un aceite en el que predomina un ácido graso monoinsaturado (oleico) [8, 12].

No se debe considerar que mientras mayor sea el NC de un biocombustible, mejor realiza la combustión en el motor. Si el NC es muy alto la combustión puede ocurrir antes de que el combustible y el aire estén adecuadamente mezclados provocando combustión incompleta y desprendimiento de humo. Si el NC es muy bajo produce fallos en el encendido, altas temperaturas del aire, calentamiento lento del motor y combustión incompleta. Por lo tanto, un biocombustible debe tener el NC lo más cercano al diesel que va a sustituir para ser adecuado [8]. El NC de los biocombustibles es mayor que el del diesel proveniente del petróleo (valor promedio de NC de los biocombustibles es 55), por lo tanto se recomienda retardar el tiempo de inyección dos o tres grados para compensar esta diferencia. Estos valores de NC provocan que el combustible arda a menor temperatura y se reducen las emisiones de óxidos de nitrógeno [13].

El valor de viscosidad encontrado para la mezcla B10 a 40°C fue de 3,28 mm²/s, valor que se encuentra en correspondencia con lo reportado en la literatura, con valores de viscosidad cinemática para B10 de biodiesel de *Moringa oleífera* a 40°C de 3,47-3,55 mm²/s [2,7,8,11,12]. Este resultado se encuentra en el intervalo de valores permitido por las normas EN-14214 (3,5 mm²/s - 5,0 mm²/s) y ASTM D-6751 (1,9 mm²/s - 6,0 mm²/s). La viscosidad cinemática del biodiesel de *Moringa oleífera* es de 5,05 mm²/s que es un valor mayor que el diesel que es de 3,23 mm²/s. Debido a la alta viscosidad del biodiesel respecto al diesel se recomienda utilizar mezclas. Esta propiedad afecta la atomización del combustible al inyectarlo en la cámara de combustión y provoca la formación de depósitos en el motor. Valores altos de viscosidad conducen a tamaños de gota más grandes, una vaporización más pobre, un ángulo de pulverización de inyección más estrecho, y una mayor penetración en el cilindro del combustible pulverizado. Esto puede traer consigo problemas en la combustión, mayores emisiones y aumento de la dilución de aceite. A mayores valores de viscosidad, mayor es la tendencia del combustible a presentar dichos problemas [1,8,14,15].

Los experimentos se realizaron con combustible diesel y con una mezcla de biodiesel de *Moringa oleífera* (B10), con el objetivo de comparar la combustión de ambos combustibles. Si no hay diferencias significativas en los comportamientos de los dos combustibles se puede utilizar una mezcla de biodiesel de *Moringa oleífera* al 10% (B10) como sustituto parcial o total del combustible diesel.

En la Figura 1 se observa un incremento ligero en la presión máxima en la cámara de combustión cuando se está usando B10. Este incremento de presión es de 7%. El incremento ligero de presión en el cilindro al utilizar biodiesel podría deberse a una mayor velocidad del proceso de combustión y a un ligero incremento en la eficiencia de la combustión, esto puede deberse a la diferencia entre el número de cetano del biodiesel y del combustible diesel en cuestión. Esto es dependiente del motor, de las condiciones de trabajo, del número de cetano del combustible y puede cambiar totalmente el comportamiento con la carga del motor.

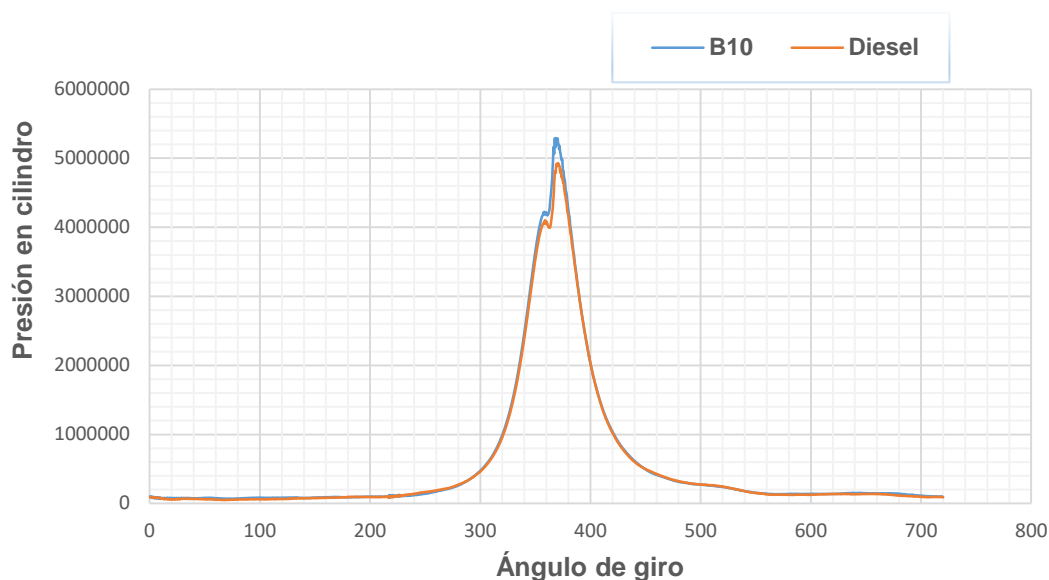


Fig.1 Presión en el interior del cilindro para diesel y B10 a 1500 rpm y 41 Nm

En la Figura 2 se muestra el diagrama de primera derivada de presión contra ángulo de giro de cigüeñal. Se observa que la combustión comienza antes para el B10 en estas condiciones. Este cambio no es numéricamente alto pues está en el orden de 3° pero ello es suficiente para que ejerza influencia en las prestaciones del motor, emisiones y calor liberado. El ligero incremento de la presión en el cilindro podría estar influenciado por el comienzo antes de la combustión. Este es un fenómeno típico de biodiesel ya que éste tiene un número de cetano superior al diesel y por tanto se acorta el tiempo de retardo de la ignición.

En la Figura 3 se muestra una gráfica comparativa de las emisiones de óxidos nitrosos cuando se utiliza B0 o B10 para diferentes cargas del motor. Se puede apreciar un aumento sustancial de las emisiones de NOx cuando se hace funcionar el motor con B10; esto se debe a que la presión en la cámara de combustión es mayor y por lo tanto también la temperatura y debido a esto la combustión es más eficiente. Las emisiones de NOx están directamente relacionadas con la temperatura en la cámara de combustión.

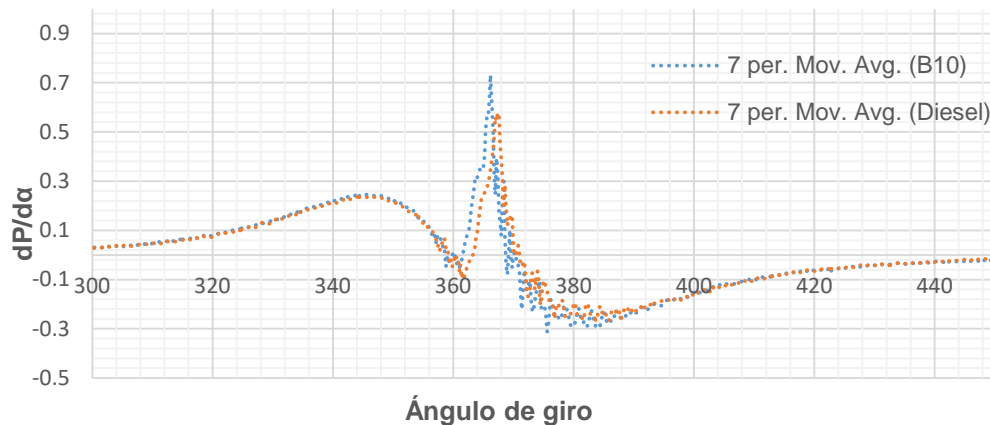


Fig.2 Primera derivada de la presión en el cilindro para diesel y B10 a 1500 rpm y 41 Nm

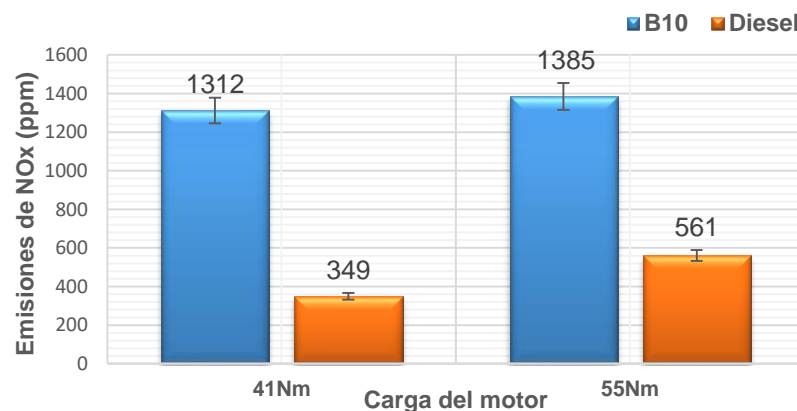


Fig.3 Comportamiento de las emisiones de NOx para el diesel y el B10 a 1500 rpm

En la literatura [2,7,11,12] se reporta un aumento de 9% cuando se usa B10 de *Moringa oleifera* en comparación con la combustión de combustible diesel. La relación aire-combustible del biodiesel es menor que para el diesel; el biodiesel al ser un combustible oxigenado provoca un aumento en la temperatura de la cámara y mejora combustión. Además, el biodiesel contiene porcentajes más altos de ácidos grasos insaturados que tienen una temperatura de llama adiabática más alta, que causa mayores emisiones de NOx.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló una prueba de banco a una mezcla de biodiesel de *Moringa oleifera* al 10% con combustible diesel. A partir del perfil de ácidos grasos y utilizando RNA se obtuvo que el NC de los ésteres metílicos es de 57,30. Los resultados obtenidos son cercanos a estudios realizados donde se reportan valores de NC. El valor de viscosidad encontrado para la mezcla B10 a 40°C fue de 3,28 mm²/s, valor que se encuentra en correspondencia con lo reportado en la literatura. Se observa un incremento ligero en la presión máxima en la cámara de combustión cuando se está usando B10. Este

incremento de presión es de 7%. Se observa que la combustión comienza antes para B10 en estas condiciones. Este cambio no es numéricamente alto pues está en el orden de 3° pero ello es suficiente para que ejerza influencia en las prestaciones del motor, emisiones y calor liberado. Se pudo constatar un incremento considerable de las emisiones de NOx, superiores a las previamente reportadas para este tipo de biodiesel.

Referencias

1. Wakil, M.A., Kalam, M.A., Masjuki, H.H., Atabani, E.A., Rizwanul, F.I.M., *Influence of biodiesel blending on physicochemical properties and importance of mathematical model for predicting the properties of biodiesel blend*. Energy Conversion and Management, 2015. **94**: p. 51-67.
2. Mofijur, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Atabani, A.E., Memon, L.A., Ashrafur, R.S.M., *Performance and emission analysis of Jatropha curcas and Moringa oleifera methyl ester fuel blends in a multi-cylinder diesel engine*. Journal of Cleaner Production, 2014. **65**: p. 304-310.
3. Tobío-Pérez, I., et al., *Evaluación de mezclas de biodiesel de Jatropha curcas (L.) en bancos de motores diesel*. Pastos y Forrajes, 2018. **41**(4): p. 300-309.
4. Tobío-Pérez, I., *Evaluación de biodiesel de Jatropha curcas y mezclas diesel-biodiesel para su uso en transporte agrícola*, 2019. Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de La Habana.
5. Fernández, L.L.C., Montiel, M.J., Millán, O.A., Badillo, C.J., *Producción de biocombustibles a partir de microalgas*. Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable, 2012. **8**(3): p. 101-115.
6. Vera, G.A.C., *Actividad Catalítica de una arcilla pilareada para la síntesis de biodiesel*, 2012. Tesis de Grado, Universidad Autónoma de Coahuila.
7. Mofijur, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Atabani, A.E., Arbab, M.I., Cheng, S.F., *Properties and use of Moringa oleifera biodiesel and diesel fuel blends in a multi-cylinder diesel engine*. Energy Conversion and Management, 2014. **82**: p. 169-176.
8. Colectivo de Autores, *Biocombustibles para su uso en motores diesel*, 2014. Ed. IDICT: La Habana. ISBN: 978-959-234-095-4.
9. Piloto-Rodríguez, R., Sánchez-Borroto, Y., Lapuerta, M., Goyos-Pérez, L., Verhelst, S., *Prediction of the cetane number of biodiesel using artificial neural networks and multiple linear regression*. Energy Conversion and Management, 2013. **65**: p. 255-261.
10. Piloto, R., Sanchez, Y., Goyos, L., Verhelst, S., *Prediction of cetane number of biodiesel from its fatty acid ester composition using Artificial Neural Networks*. Renewable Energy & Power Quality Journal, 2013. **11**: p. 1-5.
11. Mofijur, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Atabani, A.E., Rizwanul, F.I.M., Mobarak, H.M., *Comparative evaluation of performance and emission characteristics of Moringa oleifera and Palm oil based biodiesel in a diesel engine*. Industrial Crops and Products, 2014. **53**: p. 78-84.
12. Mofijur, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Atabani, A.E., Shahabuddin, M., Palash, S.M. *Effect of biodiesel from various feedstocks on combustion characteristics, engine durability and materials compatibility: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **28**: p. 441-455.
13. Rondón, M.M., Díaz, D.Y., Tabio, G.D., Fernández, S.E., Piloto, R., Rodríguez, S., *Obtención de biodiesel a partir de aceites de Origen vegetal "Moringa oleifera"*, 2017.
14. Dinis, V.P.A.C., *Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis*. Tesis de doctorado, 2012. Universidad de Extremadura.
15. Saxena, P., Jawale, S., Joshipura, M.H., *A review on prediction of properties of biodiesel and blends of biodiesel*. Procedia Engineering, 2013. **51**: p. 395-402.