



# CUANTIFICACIÓN DE LA OPACIDAD EN MOTORES ELECTRÓNICOS DIÉSEL USANDO DIÉSEL Y BIODIÉSEL

## QUANTIFICATION OF OPACITY IN DIESEL ELECTRONIC ENGINES USING DIESEL AND BIODIESEL

Carlos Mafla Yépez<sup>1,\*</sup>, Rommel Imbaquingo Navarrete<sup>1</sup>, Jorge Melo Obando<sup>1</sup>,

Ignacio Benavides Cevallos<sup>1</sup>, Erik Hernández Rueda<sup>1</sup>

### Resumen

El presente estudio tiene la finalidad de determinar los niveles de opacidad con el uso de diésel fósil como de biodiésel a base de higuera al 15 % (B15). Para la determinación de la opacidad se utilizó un banco de pruebas de motores diésel electrónico, se realizó las mediciones de opacidad usando un opacómetro debidamente calibrado. El opacómetro consta de una sonda la cual se le instala en el extremo del tubo de escape, captando los gases y arrojando valores propios por cada prueba, considerando los tipos de combustibles fósil o biocombustible y el régimen del motor, sometiendo a varias revoluciones por minuto que van de 1200 a 3000 por cada combustible. Al concluir las pruebas el opacómetro permitió obtener una opacidad de 11,1 % con diésel fósil y 0,386 con biodiésel B15 obteniendo una reducción del 96 % de opacidad, a la vez se obtuvo un promedio de opacidad de las pruebas por cada tipo de combustible siendo este valor el que se comparará con las normas nacionales e internacionales concernientes a este estudio. Con estos resultados se contribuye a la mejor conservación del ambiente ya que se emana menor cantidad de hollín, de igual manera se disminuye las enfermedades respiratorias y de corazón de las personas según la organización mundial de la salud.

**Palabras clave:** biodiésel, B15, diésel fósil, higuera, opacidad, RPM.

### Abstract

The present study has the purpose of determining the levels of opacity with the use of diesel as biodiesel based on castor oil at 15% (B15). For the determination of the opacity an electronic diesel engine test bench was used, the opacity measurements were made using a duly calibrated opacimeter. The Opacimeter consists of a probe which is installed at the end of the exhaust pipe, which captures the gases and yields values for each test, considering the types of fossil or biofuel fuels and engine speed, subjecting several RPMs that go from 1200 to 3000 for each fuel. At the end of the tests, the opacimeter allowed to obtain values that indicate the difference in opacity and to make a comparative analysis of the use of diesel and biodiesel. At the same time, an average opacity of the tests was obtained for each type of fuel, this value being the same that will be compared with the national standard concerning this study. From the tests carried out, a 96% reduction in the opacity of the engine could be evidenced with the use of B15 biodiesel from Higuera oil compared to diesel.

**Keywords:** biodiesel, B15, fossil diesel, castor oil, opacity, RPM.

<sup>1,\*</sup>Grupo de investigación en motores de combustión interna con biocombustible (BICER), Universidad Técnica del Norte, Ibarra – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: [cnmafla@utn.edu.ec](mailto:cnmafla@utn.edu.ec), <http://orcid.org/0000-0003-3704-8676>  
<https://orcid.org/0000-0001-7140-3374>, <https://orcid.org/0000-0003-0546-6988>  
<https://orcid.org/0000-0003-3332-8523>, <https://orcid.org/0000-0003-1969-9619>

Recibido: 15-11-2017, aprobado tras revisión: 28-12-2017

Forma sugerida de citación: Mafla, C.; Imbaquingo, R.; Melo, J.; Benavides, I.; Hernández, E. (2018). «Cuantificación de la opacidad en motores electrónicos diésel usando diésel y biodiésel». INGENIUS. N.º 19, (enero-junio). pp. 102-107. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.10>.

## 1. Introducción

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ ) son los causantes de provocar el calentamiento global, el deterioro del ambiente y la salud de los seres humanos [1]. Según la Organización Mundial del Medio Ambiente, la industria automotriz es la causante del 15 % de la contaminación del ambiente a nivel mundial. Algo muy importante y que no se debe obviar al momento de usar combustibles fósiles es su potencial de generación de emisiones contaminantes, entre los cuales se encuentran el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), principal gas causante del efecto invernadero; monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), que tiene efectos letales sobre el hombre; óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) e hidrocarburos inquemados o parcialmente quemados ( $\text{HC}$ ), principales formadores de esmog fotoquímico en presencia de luz; emisiones sulfurosas ( $\text{SO}_x$ ), causantes de la lluvia ácida, generador de sulfatos, y material particulado, causante de enfermedades respiratorias y cáncer [2].

Además, se conoce que el parque automotor de vehículos con motor a gasolina y diésel va en aumento, siendo estos últimos los responsables de la emisión de partículas de hollín al ambiente.

El hollín, la ceniza y el polvo son partículas relativamente pesadas que se depositan en el suelo y el aire las limpia rápidamente. Pero cerca de su fuente de origen constituyen con frecuencia un peligro para la salud, ya que pueden causar enfermedades respiratorias crónicas tales como el enfisema y el cáncer [3].

El porcentaje de opacidad es la unidad de medición que determina el grado de opacidad de las emisiones de escape de una fuente móvil a diésel, en el Ecuador esta unidad aporta el Instituto Ecuatoriano de Normalización en la norma técnica NTE INEN 2 202:2000, donde manifiesta que los límites máximos de opacidad de emisiones para fuentes móviles con motor diésel son: A partir del año 2000 en adelante es el 50 % de opacidad y los modelos posteriores al año 2000 es el 60 % de opacidad [4].

Por tal razón la comunidad científica se encuentra en una incansable labor de buscar nuevas fuentes de energía limpia y renovable, que ayude a disminuir las emisiones a la atmósfera y por ende reducir las enfermedades producidas en el ser humano.

Así es como una alternativa al diésel fósil es el biodiésel, el cual es un biocombustible líquido renovable que está compuesto por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales que se mezclan, en diferentes porcentajes con gasoil [5], además, es un combustible alternativo de carbón neutro que se debe tomar en cuenta como mecanismo para reducir las emisiones de gases contaminantes que se producen en la combustión [6].

En la actualidad se encuentra varias tecnologías para la producción de biodiésel, los aceites vegetales tienen propiedades que permiten poder manipular su densidad y viscosidad, por lo cual estos aceites son adecuados para la producción de biodiésel [7].

El biodiésel tiene algunas características muy interesantes: No se necesitan grandes cambios en el motor, es biodegradable e inocuo para el ambiente, genera empleo en zonas rurales, diversifica las fuentes de energía [8].

Mediante el uso de biodiésel puro o mezclado, se ha conseguido fantásticos resultados. El uso de este biocombustible ha disminuido considerablemente el potencial de destrucción de la capa de ozono hasta en un 50 %, las emisiones de sulfatos y óxidos de azufre son eliminados con el biodiésel puro, estos son componentes principales de la lluvia ácida y se ligan a la formación de partículas principalmente por el contenido de azufre y el contenido de componentes aromáticos pesados [9], el uso del biodiésel en los motores diésel provoca una importante reducción de los hidrocarburos totales sin quemar, del monóxido de carbono y de las partículas en suspensión; las emisiones de los óxidos de nitrógeno son similares o aumentan ligeramente [10].

En lo referente a motores diésel, el biodiésel, dadas las ventajas técnicas, estratégicas y ambientales que ofrece, constituye la mejor alternativa para sustituir parcial o totalmente al combustible diésel derivado del petróleo [11].

Al utilizar biodiésel se logra disminuir las emisiones de  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  presentes en la combustión debido a que una molécula de biodiésel contiene entre 12 y 18 carbonos, y, una molécula de diésel puede contener hasta 20 carbonos [12].

Las propiedades del biodiésel influyen mucho en las emisiones de hollín al ambiente, por tal motivo la calidad del biodiésel B15 de aceite de higuera obtenido son: Su alto índice de cetano 50.5 y su alta viscosidad  $5.02\text{mm}^2/\text{s}$  [11]. De otro lado, el biodiésel de aceite de higuera posee puntos de nube y fluidez que le dan ventajas para su uso a bajas temperaturas.

La opacidad de los humos es una medida indirecta del contenido de hollín que tiene el material particulado generado durante la combustión y el escape. El biodiésel en su estructura química aporta oxígeno extra a la combustión, por lo que se espera que facilite la oxidación de las partículas y por tanto se dé una disminución en la opacidad de humos a medida que aumenta su concentración en las mezclas [13].

### 1.1. Producción de biodiesel

El biodiésel se origina debido a una reacción química, como es la transesterificación, donde el glicerol presente en los aceites es suplido por un alcohol, como es el metanol, generalmente empleado en la elaboración con aceites vegetales reciclados, y en mezclas con etanol en aceites nuevos; ante la presencia de un catalizador.

Se puede utilizar como catalizador, hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH), al utilizar KOH, la glicerina resultante del proceso es mucho menos tóxica que al emplear NaOH, además, el hidróxido de potasio se disuelve mucho mejor en metanol. Para que el proceso sea lo más eficiente posible los catalizadores deben tener una pureza de por lo menos 96 % para el NaOH y alrededor de 92-85 % en el KOH, este último bastante difícil de encontrar con una pureza superior.

La transesterificación consiste en la reacción entre un triglicérido (compuesto por una molécula de glicerol esterificada por tres moléculas de ácidos grasos) contenido en el aceite de ricino y el alcohol (metanol o etanol), originando glicerina y ésteres derivados de los ácidos grasos; al utilizar metanol, el biodiésel estará compuesto por ésteres metílicos. El catalizador se disuelve en alcohol ligero (metanol), para luego ingresar al reactor, junto con el aceite crudo extraído del ricino, donde permanecerán a una temperatura mínima de 45,4 °C y máxima de 55 °C, a un régimen de 3000 rpm, alrededor de 3 horas, dando lugar al proceso de transesterificación, posteriormente se separará la glicerina, la cual pasará por un proceso de lavado, el cual radica en agregar el 26 % de agua en volumen de aceite.

Finalmente, se realiza el proceso de evaporación del agua, a temperaturas de alrededor 100 °C, para luego mezclarlo con diésel fósil en proporción B15 y emplearlo en motores de compresión.

Al emplear biodiésel se logra reducir las emisiones de monóxido y dióxido de carbono presentes en la combustión, ya que una molécula de biodiésel contiene entre 12 y 18 carbonos, y, una molécula de diésel de origen fósil puede contener hasta 20 carbonos [14].

### 1.2. Propiedades del biodiesel de Higuierilla B15

Las propiedades fisicoquímicas del biodiésel B15 se determinaron en los laboratorios de petróleos de la Universidad Central obteniendo resultados positivos, en la Tabla 1, se indica los más relevantes:

**Tabla 1.** Propiedades fisicoquímicas del B15

Determinación	Resultado
Densidad API A 60 F	544,62
Punto de inflamación* °C	72,1
Azufre* % P	0,0148
Índice de cetano calculado	51

Una de las características principales del combustible diésel es el cetano, este indica la calidad del combustible, como se puede observar se tiene un valor de 51 logrando así en la combustión una mejor expansión y quema de los gases que se generan y por ende

una menor contaminación ambiental. Dichos parámetros se encuentran en investigación en proyectos de la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Técnica del Norte.

Debido a los grandes beneficios que ha mostrado el uso de biodiésel, la finalidad de este artículo es evidenciar la disminución de la opacidad con el uso de biodiésel B15 a base de higuierilla.

## 2. Materiales y métodos

El presente estudio se basa en un estudio cuantitativo experimental de tipo descriptivo transversal.

Primeramente, de orden cuantitativo en la obtención de resultados de porcentajes de opacidad existentes en cada prueba considerando el tipo de combustible y el régimen del motor, además, en el análisis comparativo de resultados *versus* las tablas de valores límites de opacidad para motores diésel apegados a la norma INEN 2 207:2002.

De tipo experimental: En la obtención del biodiésel a partir de la planta de higuierilla y en las mediciones de la opacidad efectuados en el sistema de escape del vehículo.

De tipo descriptivo en el análisis de los resultados comparativos, de realización de pruebas y en la descripción en sí del estudio.

De tipo transversal ya que se realizó en un tiempo determinado, permitió obtener la información de forma inmediata y además correlacionar resultados obtenidos desde las diferentes pruebas y los valores que impone la norma nacional vigente y poder determinar los beneficios de uno y otro combustible con el ambiente.

Para poder determinar y analizar la opacidad de los gases de escape para motores diésel se utilizó un opacímetro marca Braen Bee modelo OPA 100 [15] de propiedad de la Universidad Técnica del Norte en la ciudad de Ibarra, calibrado a la normativa vigente ecuatoriana y un banco de pruebas experimentales de motores diésel, para nuestro caso se realizó las pruebas en un motor diésel marca Mazda modelo BT-50 año 2013, 4 cilindros, potencia de 157.30 HP a 3500 RPM y torque de 363 Nm a 1800 RPM, sistema de inyección directa electrónica CRD-i recalando que el motor estuvo en condiciones estándar para las respectivas pruebas.

En cuanto a los combustibles se utilizó biodiésel de higuierilla B15 (15 % de biodiésel y 85 % de diésel fósil) y diésel fósil puro comparándose entre sí los resultados de opacidad obtenidos por cada combustible.

Se realizaron 10 pruebas por cada tipo de combustible y a las RPM anteriormente nombradas previo a una respectiva limpieza del sistema de inyección de combustible con la finalidad de obtener resultados óptimos y más precisos.

Las mediciones de opacidad se realizaron a la temperatura normal de funcionamiento de 80 °C, una vez cumplida esta condición se procede a calentar el opacómetro siendo una función automática con la que cuenta, seguidamente se realiza una prueba de verificación del opacómetro descartando posibles fugas denominándose a esto como auto cero, finalmente, se introduce la sonda a la abertura del tubo de escape y se realizan las pruebas tanto con biocombustible como con combustible fósil, cada una de ellas realizadas a varios regímenes del motor: 1200, 1500, 2000, 2500, 3000 RPM.

A continuación, en la Tabla 2 se indica los porcentajes de opacidad obtenidas usando diésel fósil, como se indicó anteriormente se realizó a varias RPM tomando en cuenta las condiciones más comunes de funcionamiento del motor donde se puede apreciar que a mayores revoluciones es mayor la opacidad esto se debe al mayor consumo de combustible.

**Tabla 2.** Pruebas de opacidad diésel fósil

RPM	OPA 1	OPA 2	OPA 3	OPA 4	OPA 5	OPA 6	OPA 7	PRO. OPA
1200	9,8	9	10	8,7	9	10	9,9	9,5
1500	10,9	9,7	10,8	9,7	9,7	10,1	10,7	10,2
2000	11,7	10,8	11,1	10,8	10,5	11,8	11,1	11,1
2500	12,9	11,3	11,9	11,5	11,6	12,3	11,9	11,9
3000	13,5	12,8	12,6	12,7	12,5	12,7	12,6	12,8

En la Tabla 3 se observa los resultados de opacidad utilizando biodiésel B15 donde se replicó la misma metodología para realizar dichas pruebas, se obtuvieron porcentajes de opacidad más bajos y de la misma manera a mayores revoluciones mayor opacidad.

**Tabla 3.** Pruebas de opacidad B15

RPM	OPA 1	OPA 2	OPA 3	OPA 4	OPA 5	OPA 6	OPA 7	PRO. OPA
1200	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,19
1500	0,3	0,3	0,2	0,1	0,15	0,2	0,3	0,22
2000	0,4	0,4	0,4	0,1	0,2	0,2	0,4	0,3
2500	0,6	0,7	0,8	0,1	0,2	0,3	0,6	0,47
3000	0,6	1,1	1	0,55	0,5	0,5	1	0,75

De acuerdo con la norma INEN 2 207:2002, la Tabla 4 muestra los límites de opacidad de emisiones para vehículos diésel (pruebas de aceleración libre).

**Tabla 4.** Porcentaje de opacidad [4]

Año y modelo	% opacidad
2000 y posteriores	50
1999 y anteriores	60

Las normas internacionales con las que se trabajó para este estudio son las normas EURO donde manifiestan: Vehículos con motor diésel sobrealimentados matriculados por primera vez antes del 01/07/2008:

30 % de opacidad, tomando en cuenta que esta ley indica la EURO 3 la que se encuentra en vigencia en Ecuador.

### 3. Resultados y discusión

En la Figura 1, se observa el resultado de opacidad utilizando como combustible diésel fósil, dando como resultado un promedio de opacidad de 11,1 %, con este resultado el motor aprobaría sin problemas las normas nacionales e internacionales.

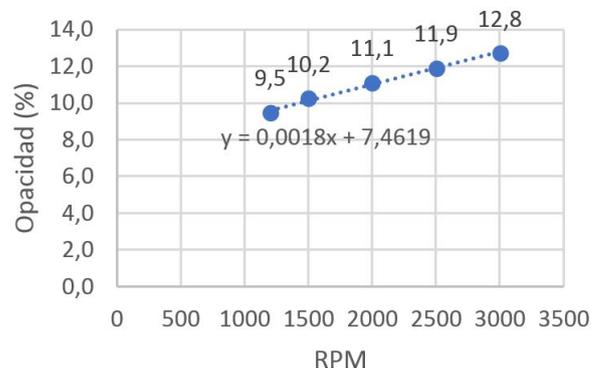
Tomando en cuenta que las pruebas se realizan en un motor electrónico y que por sus características de funcionamiento se obtiene niveles bajos de opacidad, se analiza los porcentajes de opacidad a 1200 RPM dando como resultado 9,5 % y a 3000 RPM 12,8 % de opacidad. Dando como resultado un valor promedio de opacidad de 11,1 %. Comparando todos los datos se adquiere la ley de opacidad para diésel fósil, en la ecuación (1).

$$Diésel\ fósil_{opa} = 0.0018(RPM) + 7.4619 \quad (1)$$

Donde:

Opa: Opacidad.

RPM: Revoluciones del motor.



**Figura 1.** Porcentaje de opacidad diésel fósil

Luego de realizar las pruebas de opacidad utilizando biodiésel B15 en el mismo motor y con las mismas condiciones que las pruebas anteriores, antes de realizar las pruebas se purgó todo el sistema de alimentación para asegurar los resultados obtenidos.

En la Figura 2, se demuestra los resultados de opacidad en 7 pruebas, a diferentes RPM del motor donde a 1200 RPM se encontró una opacidad de 0,19 % y a 3000 RPM se obtuvo 0,75 % de opacidad, obteniendo un valor promedio de opacidad de 0,38 % siendo este resultado óptimo para el motor. De igual manera, se pudo encontrar la ley para calcular la opacidad con el uso de biodiésel B15, que se muestra en la ecuación (2).

$$B15_{opa} = 0.0706e^{0.0008RPM} \quad (2)$$

Donde:

B15: Mezcla biodiésel.

Opa: Opacidad.

RPM: Revoluciones por minuto del motor.

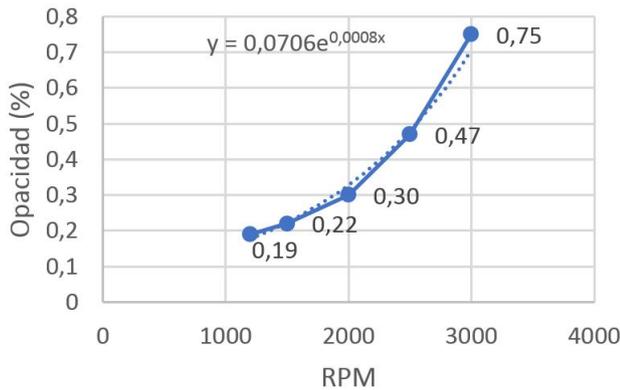


Figura 2. Porcentaje de opacidad B15

La Figura 2 muestra el porcentaje de opacidad de acuerdo con las RPM del motor, se puede apreciar un aumento del porcentaje de opacidad, esto se debe a que a mayores RPM existe mayor consumo de combustible y por ende una mayor cantidad de combustible no quemado originando cantidades superiores de hollín. La norma ecuatoriana INEN 2 207:2007 manifiesta que para los vehículos con motor diésel el límite de opacidad es del 50 % analizando los resultados se concluye que usando biodiésel al 15 % los porcentajes de opacidad disminuyen en valores considerables.

Comparando las gráficas para cada tipo de combustible, B15 y diésel fósil se evidencia una representativa diferencia de valores de opacidad, analizando la línea de tendencia del diésel se observa que según aumenta las RPM del motor es proporcional el porcentaje de opacidad, donde el incremento de opacidad en cada RPM es mayor en comparación al uso de B15 que de la misma manera al aumentar las RPM se eleva el porcentaje de opacidad, pero se puede observar la diferencia en la línea de tendencia, donde en las mismas RPM el aumento de opacidad es menor. Se puede apreciar un aumento promedio de opacidad con diésel fósil de 0,9 % por cada 500 RPM de incremento, mientras que a las mismas condiciones la opacidad con biodiésel B15 aumenta un promedio de 0,17 % disminuyendo un 96 % las emisiones de hollín del motor.

Analizando la normativa nacional y tomando en cuenta las características del motor se puede concluir que el motor aprueba sin faltas el porcentaje de opacidad con los dos combustibles; diésel fósil y biodiésel con mezcla B15, donde respectivamente se tiene el valor de opacidad de 11,1 % y 0,38 %, analizando los datos se obtiene una disminución de opacidad del 96 % con el

uso de biodiésel B15. Tomando en cuenta las normas internacionales EURO, las mismas que manifiestan que los vehículos no deben sobrepasar un porcentaje de opacidad del 30 %, los datos obtenidos aprueban las normas EURO, recalando que las pruebas se realizaron en un banco de pruebas de motor diésel electrónico Mazda BT-50 en perfectas condiciones tanto sus elementos mecánicos como electrónicos.

En la Figura 3 se muestra los datos comparativos del porcentaje de opacidad con combustible fósil y biocombustible B15.

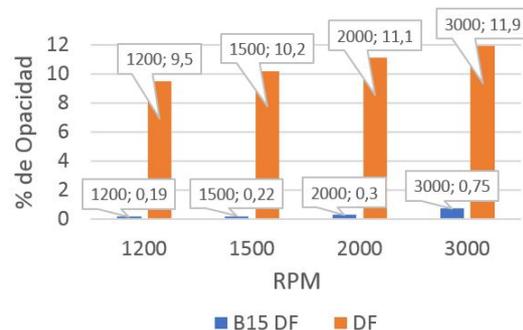


Figura 3. Gráficas comparativas diésel fósil y biodiésel B15

## 4. Conclusiones

Con la utilización de biodiésel B15 a base de aceite de hígado de pescado la opacidad disminuye un 96 % con respecto a la utilización del diésel fósil, esto se debe al aumento de la temperatura en la cámara de combustión y a la mejor oxidación de la mezcla.

Con las ecuaciones obtenidas en este estudio se puede conocer de una manera más rápida la opacidad con el uso de los dos combustibles, considerando el uso de motores de las mismas características a la del estudio.

Usando biodiésel se puede mitigar en un gran porcentaje las enfermedades cancerígenas en los pulmones de las personas, así es como manifiesta la OMS donde las partículas más pequeñas de hollín son las causantes de este problema.

La maqueta de motor utilizada para el estudio se encuentra en óptimas condiciones, por tal motivo sus valores con diésel fósil y biodiésel son bajos, en vehículos de calle estos porcentajes pueden variar en pequeños porcentajes.

## Referencias

- [1] J. Hernández Gaitán, G. Zambrano Ruano, and C. Rossi, "Emisión de gases en vehículos experimentales diesel-biodiesel," *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala*, no. 27, pp. 64-67, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/AfA1vR>

- [2] A. A. Agudelo, J. Agudelo, and P. Benjumea, “Diagnóstico exergético del proceso de combustión en un motor diésel,” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 45, pp. 41–53, 09 2008. [Online]. Available: <https://goo.gl/AbLZ2z>
- [3] Z. Z. Yu and L. Jing, “Effects of exhaust post-treatment technology on diesel engine emissions,” in *Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE)*, Dec 2011, pp. 1804–1807. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TMEE.2011.6199564>
- [4] INEN, *Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. determinación de la opacidad de emisiones de escape de motores de diésel mediante la prueba estática. Método de aceleración libre*, Instituto Ecuatoriano de Normalización Std., 2010. [Online]. Available: <https://goo.gl/211cW7>
- [5] F. Marcos Martín, J. Almazán Gárate, and C. Palomino Monzón, “Biodiésel de algas,” *Energética XXI*, no. 74, pp. 100–104, 2008. [Online]. Available: <https://goo.gl/UFhkYS>
- [6] S. Imtenan, M. Varman, H. Masjuki, M. Kalam, H. Sajjad, M. Arbab, and I. R. Fattah, “Impact of low temperature combustion attaining strategies on diesel engine emissions for diesel and biodiesels: A review,” *Energy Conversion and Management*, vol. 80, Supplement C, pp. 329–356, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.020>
- [7] C. S. Aalam, C. Saravanan, and M. Kannan, “Experimental investigations on a crdi system assisted diesel engine fuelled with aluminium oxide nanoparticles blended biodiesel,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 54, no. 3, pp. 351–358, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.04.009>
- [8] E. Jiaqiang, P. Minhieu, D. Zhao, D. Yuanwang, L. DucHieu, Z. Wei, Z. Hao, L. Teng, P. Qingguo, and Z. Zhiqing, “Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, Supplement C, pp. 620–647, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.250>
- [9] J. Azjargal, “The comparison of combustion characteristics and performances of diesel engine fueled with biodiesel and diesel blends,” in *2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Oct 2014, pp. 313–317. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IFOST.2014.6991129>
- [10] E. Bernard. (2010) Biodiésel: Los aspectos mecánicos en los vehículos. Centro Nacional de la Producción mss Limpia, Costa Rica. [Online]. Available: <https://goo.gl/aRbzGf>
- [11] A. Benavides, P. Benjumea, and V. Pashova, “El biodiésel de aceite de higuerilla como combustible alternativo para motores diésel,” *DYNA*, vol. 74, no. 153, pp. 141–150, 2007. [Online]. Available: <https://goo.gl/FrAArX>
- [12] J. M. Amaris, D. A. Manrique, and J. E. Jaramillo, “Biocombustibles líquidos en Colombia y su impacto en motores de combustión interna,” *Fuentes, el reventón energético*, vol. 13, no. 2, pp. 23–34, 2015, hybrid evolutionary systems for manufacturing processes. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18273/revfue.v13n2-2015003>
- [13] J. Agudelo, P. Benjumea, and J. Pérez, “Pruebas cortas en ruta en un vehículo tipo microbús con biodiésel de aceite de palma colombiano,” *Scientia et Technica*, vol. 1, no. 24, pp. 163–168, 2004. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.22517/23447214.7321>
- [14] T. Saba, J. Estephane, B. E. Khoury, M. E. Khoury, M. Khazma, H. E. Zakhem, and S. Aouad, “Biodiesel production from refined sunflower vegetable oil over koh/zsm5 catalysts,” *Renewable Energy*, vol. 90, Supplement C, pp. 301–306, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.009>
- [15] Globaltech. (2016) Opacómetro brain bee opa-100. [Online]. Available: <https://goo.gl/QPiHA2>