

ARTÍCULO DE REVISIÓN / REVIEW ARTICLE  
<https://dx.doi.org/10.14482/inde.42.01.791.582>

# Desempeño en el motor diésel con la aplicación del biodiésel

*Diesel engine performance in  
biodiesel application*

HÉCTOR HUGO RIOJAS-GONZÁLEZ\*

INDIRA RETA HEREDIA\*\*

LIBORIO JESÚS BORTONI ANZURES\*\*\*

JUAN JULIÁN MARTÍNEZ TORRES\*\*\*\*

\* PhD, profesor investigador. Universidad Politécnica de Victoria, Ingeniería en Sistemas Automotrices. Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-2401-1110>. [hriojasg@upv.edu.mx](mailto:hriojasg@upv.edu.mx)

\*\* PhD, profesora de asignatura. Universidad Politécnica de Victoria, Ingeniería en Sistemas Automotrices. Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-6573-5874>. [iretah@upv.edu.mx](mailto:iretah@upv.edu.mx)

\*\*\* PhD, profesor investigador. Universidad Politécnica de Victoria, Ingeniería en Sistemas Automotrices. Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-2025-4369>. [lbortoni@upv.edu.mx](mailto:lbortoni@upv.edu.mx)

\*\*\*\* Magister, profesor investigador, Universidad Politécnica de Victoria, Ingeniería en Sistemas Automotrices. Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0007-3859-8684>. [jmartinezt@upv.edu.mx](mailto:jmartinezt@upv.edu.mx)

**Correspondencia:** Héctor Hugo Riojas González, Universidad Politécnica de Victoria. [hriojasg@upv.edu.mx](mailto:hriojasg@upv.edu.mx)

**Dirección:** Av. Nuevas Tecnologías 5902, Parque Científico y Tecnológico de Tamaulipas, CP 87138 Cd Victoria, Tamaulipas, México. Tel: (+52) 834-187-6093.



## Resumen

Para mejorar las condiciones del motor diésel se deben analizar parámetros como las condiciones de carga de combustible (baja, alta y parcial), que influyen en la estabilidad y velocidad de la combustión, y en la generación de emisiones; además de la mezcla idónea del biodiésel y el tiempo de inyección. El efecto de la inyección al aplicar el biodiésel puede generar incremento de consumo, con su mayor viscosidad ocasiona un mayor retraso de inyección; se recomiendan alternativas para solucionar este y otros percances. En el caso de la relación de compresión en el motor diésel, es otro de los factores que influyen en la reducción de emisiones al aplicar el biodiésel, así como en el rendimiento del motor. En este trabajo se estudia el resultado de la función dual al aplicar el biodiésel como combustible piloto y biogás como combustible principal; con este último se puede lograr que el uso del biodiésel sea más competitivo, posicionándolo como combustible principal o como combustible piloto para el motor. Finalmente, se analizan el fenómeno del golpe y las emisiones generadas del biodiésel en el motor diésel.

**Palabras clave:** biodiésel, combustión, motor diésel, relación de compresión.

## Abstract

To improve diesel engine conditions, parameters such as fuel load conditions (low, high and partial), which influence the stability and speed of combustion, and the generation of emissions, should be analysed; in addition to the ideal blend of biodiesel and injection time. The effect of the injection when applying biodiesel, can generate increased consumption, with its higher viscosity causes a greater injection delay, alternatives are recommended to solve this and other mishaps. In the case of the compression ratio in the diesel engine is another factor that influences the reduction of emissions when applying biodiesel, as well as engine performance. In this paper we study the result of the dual function when applying biodiesel as pilot fuel and biogas as main fuel; with the latter, the use of biodiesel can be made more competitive, positioning it as a main fuel or as a pilot fuel for the engine. Finally, the phenomenon of the hit and the emissions generated from biodiesel in the diesel engine are analyzed.

**Keywords:** biodiesel, combustion, diesel engine, understanding ratio.

## INTRODUCCIÓN

Entre los factores que influyen en el comportamiento del motor por la combustión (usando biodiésel) se encuentra el tiempo de inyección, la materia prima del biodiésel, tipo de motor y condiciones de operación [1], las propiedades de la alta viscosidad del biodiésel generan reducción de potencia, independientemente del tipo de materia prima utilizada [2]. De acuerdo con Hansen et al. [3], un valor calorífico más bajo no es el único factor que puede reducir la potencia y el par del motor, también hay otros factores, como la densidad y la viscosidad, por lo que una atomización más baja, generada por una mayor viscosidad, puede reducir la capacidad de combustión y reducir su potencia [4]. Además, una mayor lubricación del biodiésel reducirá la pérdida por fricción y, en consecuencia, se mejora la potencia, junto con el par del motor [5]. La reducción de hollín y óxidos de nitrógeno (NOx) se puede lograr a través de algunas técnicas, tales como: quemadura pobre, la recirculación de los gases de escape, el retardo del tiempo de ignición, inyección dividida (inyecciones múltiples), adición de metanol y procesamiento catalítico [6]. La metodología empleada es de revisión bibliográfica, la cual tiene como objetivo analizar la posibilidad de que el biodiésel sea realmente un combustible adecuado en la combustión y rendimiento en el motor diésel, conociendo sus ventajas y desventajas.

## RELACIÓN DEL PORCENTAJE DE DOSIS DEL BIOCOMBUSTIBLE

Una mezcla de hasta el 20 % de biodiésel con diésel funciona bien sin ninguna modificación en el motor [7]. En la tabla 1 se puede observar la relación del porcentaje de dosis del biodiésel en distintas pruebas.

**TABLA 1.** LA RELACIÓN DEL PORCENTAJE DE DOSIS DE MEZCLA DEL BIODIÉSEL EN MOTOR DIÉSEL

Tipo de biodiésel	Dosis óptima	Condiciones de operación	Referencia
Aceite frito de desecho metilo éster (WFOME)	50%	Motor de un cilindro, 4 tiempos, inyección directa, con el biodiésel se redujo el BTE y se aumentó el BSFC	[8]
Aceite de plástico de polietileno de alta densidad	40%	Motor de un solo cilindro DI, el BTE fue bajo en todas las cargas	[9]
Aceite de trementina	30%	Con el biodiésel mejoro la potencia de frenado y la velocidad de liberación del calor	[10]

Continúa...

Tipo de biodiésel	Dosis óptima	Condiciones de operación	Referencia
Aceite de <i>Jatropha</i>	50%	Con esa dosis (50 %) el bioaceite podría reemplazar al diésel sin ninguna modificación al motor	[11]
Aceite de <i>algas</i>	10%	Con la adición del biodiésel aumento el BTE con respecto al diésel en mezcla con WPO	[12]
<i>Jatropha metil éster</i>	20%	La mezcla de <i>Jatropha</i> con WPO generó un aumento de BTE y BSFC	[13]
WPO residuos de polietileno	5%	En mezcla con diésel representó la mejor alternativa de dosis donde aumentó la potencia	[14]
Biodiésel de <i>Cymbopogon flexuous</i>	20%	Con la adición del 20 % del biodiésel se tiene mayor eficiencia y menor ahorro de combustible, pero es más baja que el diésel	[15]
Aceite de karanja	20%	Con la dosis del 20 % del biodiésel se obtuvo un mejor consumo de combustible y mejor eficiencia térmica	[16]
Aceite de soja	5%	Concluyeron que con un 5 % del biodiésel, el resto con diésel y un 10 % de EGR no afectó la eficiencia térmica ni el rendimiento del freno	[17]

Fuente: Autores

## CONDICIONES DE CARGA APLICANDO BIODIÉSEL

En condiciones de carga (cantidad de mezcla en la cámara antes de su combustión) parcial, el CO aumenta; sin embargo, a mayor carga; la concentración de NOx es menor en comparación con el funcionamiento normal de un motor diésel [18]. La emisión de HC del biodiésel puro se reduce comparándolo al biodiésel en baja carga, por

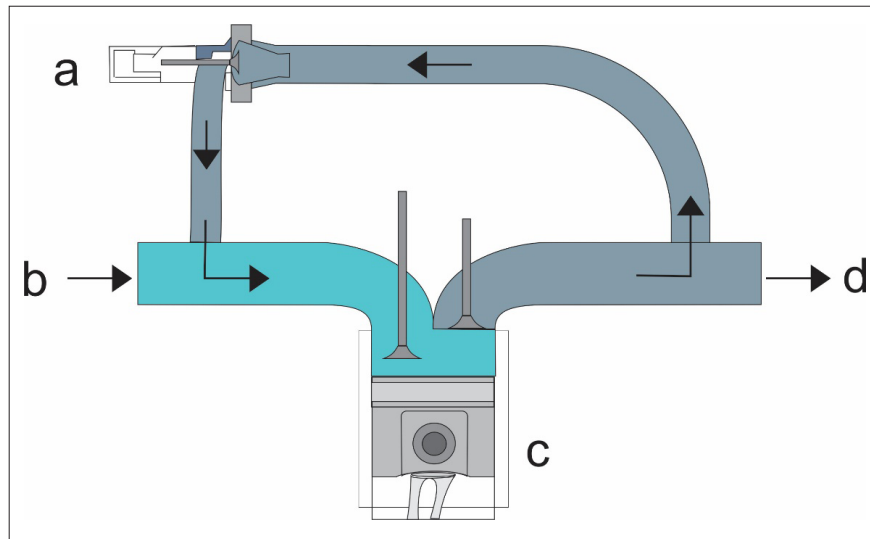
el contrario, la emisión de HC de biodiésel puro es más que la del combustible biodiésel a media y alta carga; algunos factores que influyen en las condiciones de carga son la atomización, la mezcla de aire, el combustible y la adecuada ignición [19]. El porqué es importante la concentración del oxígeno en la mezcla, lo explican Roy et al. [20], quienes indican que el factor clave para reducir las emisiones de CO del biodiésel está asociado con la presencia del contenido del oxígeno en las mezclas para una combustión completa [21]. Sin embargo, Cagua et al. [22] pudieron demostrar que el aumento del oxígeno puede ayudar a mejorar la estabilidad para la combustión, acortando el periodo de encendido y mejorando la velocidad de combustión. Por otro lado, Miyamoto et al. [23] señalaron que la reducción de las emisiones de escape y la eficiencia térmica dependían totalmente del contenido de oxígeno del biodiésel, independientemente de las relaciones de mezcla o el tipo de oxigenado.

### **Funcionamiento del motor en cargas bajas con biodiésel**

En cargas más bajas, el combustible dual sufre una baja eficiencia térmica y mayores porcentajes de combustibles sin quemar [18]; bajo condiciones de carga baja, el rendimiento del motor de combustible dual se deteriora en comparación con la operación del diésel normal; bajo estas condiciones, la mezcla se convierte demasiado magra, por lo que se quema muy lentamente, y esto resulta en una menor eficiencia térmica [24]. Corsini et al. [25] al estudiar el comportamiento del diésel multi-jet utilizando aceites vegetales (aceites de colza), concluyeron que en menores cargas se genera una pérdida de potencia, debido a su mayor densidad y viscosidad del aceite vegetal y con el tiempo puede incrementar las emisiones de HC.

### **Funcionamiento del motor en cargas altas con biodiésel**

El biodiésel aplicado en modo de combustible dual mejora la calidad de la combustión, particularmente en altas cargas del motor [26] (tabla 2); en el caso del aceite de residuo de plástico sufre un drástico aumento de la emisión de CO a cargas más altas, el cual se debe a un mayor consumo de combustible (combustión incompleta) y a la reducción de la temperatura en el cilindro [27]; en la tabla 3 se puede observar el comportamiento del motor con el aceite de residuo plástico. Se han investigado y propuesto soluciones para mejorar la carga parcial en el combustible parcial, como la aceleración de la carga de aire de admisión [28], el aumento de la presión de aire de admisión [29], la temperatura [30], la cantidad controlada y el tiempo de inyección del piloto [31], [32] o flujo y temperatura controlada de EGR (figura 1) [33], [34].



Fuente: autores.

**FIGURA 1.** SISTEMA EGR CONFORMADO POR: A) EGR, B) ADMISIÓN, C) MOTOR Y D) ESCAPE

**TABLA 2.** COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DIÉSEL EN ALTAS CARGAS CON BIODIÉSEL

Tipo de biodiésel	Emisión que reduce	Emisión que aumenta	Condiciones de operación	Referencia
Biodiésel de residuos de aceites comestibles	---	NOx	El mismo aumento en altas cargas se redujo con cargas bajas; esto último fue debido a que la temperatura se reduce	[35]
Biodiésel de aceite de palma calentado	NOx	CO	Con un precalentamiento a 100°C su operación es muy similar al diésel y a cargas más altas aumenta el CO debido a la falta de oxígeno	[36]
Biodiésel del aceite de soja crudo	CO y humo	NOx	A mayores cargas del motor la presión máxima en el cilindro del biodiésel fue similar a la del diésel	[37]

Continúa...

Tipo de biodiésel	Emisión que reduce	Emisión que aumenta	Condiciones de operación	Referencia
Biodiésel de éster metílico de aceite vegetal usado y aceite vegetal hidrogenado	NOx	Humo	Se investigó en motor diésel V6 de inyección directo turboalimentado con barrido de EGR, con cargas altas aumento el BSFC, con el aumento EGR redujo el NOx pero aumento el humo.	[38]

Fuente: autores.

**TABLA 3.** RENDIMIENTO DEL MOTOR APLICANDO ACEITE DE PLÁSTICO RESIDUAL (WPO) COMPARÁNDOLO CON DIÉSEL CONVENCIONAL

Tipo de rendimiento	Condiciones de operación	Referencia
El BSFC fue menor y el BTE aumento	Motor diésel, 4 tiempos, inyección directa y velocidad constante de 1500 rpm	[39]
Tuvo menor BTE en condiciones de carga	Motor diésel, 4 tiempos, inyección directa, cilindro de doble enfriado con velocidad constante	[9]
Tuvo una disminución de BTE	Las eficiencias térmicas de la mezcla con WPO son bajas particularmente en plena carga	[40]
El BTE se redujo	Para todas las mezclas la eficiencia bajó junto con la presión del cilindro y tuvo un retraso de encendido más alto que el diésel	[41]
Leve caída del BTE debido al bioaceite	Motor CRDI de dos cilindros con EGR al momento de adicionar el bioaceite bajó su rendimiento	[42]

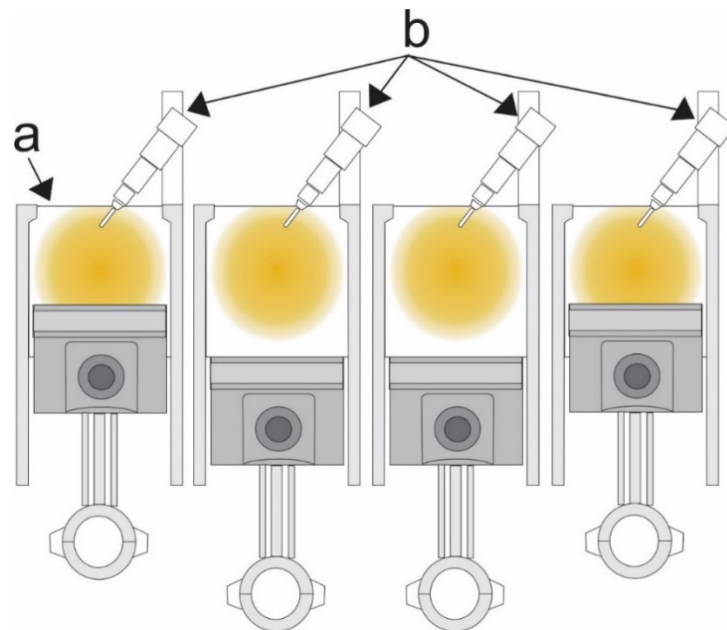
Fuente: autores.

## EFECTO DE LA INYECCIÓN DEL BIOCOMBUSTIBLE

La mayoría de los trabajos en motores alimentados con biodiésel hacen uso de los sistemas de inyección convencionales con PIO limitado hasta con 300 bar, lo que conduce a un BTE pobre y mayores emisiones. Estos inconvenientes pueden superarse

utilizando diferentes estrategias de inyección, como puede ser los tamaños de los orificios de boquillas y cámaras de combustión compatibles [43]. La tecnología *Common Rail Direct Injection (CRDI)* es la tecnología más ampliamente utilizada para aumentar la eficiencia del combustible; muchos trabajos se han realizado con motores CRDI utilizando varios combustibles de biodiésel [44].

Desafortunadamente, por su mayor viscosidad y densidad, el biodiésel puede crear problemas al sistema de inyección Tesfa et al. [45] señalan que se reduce el rendimiento de la bomba de combustible en el encendido por compresión. El biodiésel tiene un contenido energético ligeramente menor que el diésel, por lo que esto aumentaría el consumo del combustible en un 2-10 % [46]. La combustión del biodiésel comienza un poco más tarde que el diésel, debido a su mayor retraso en la inyección, y como el biodiésel tiene mayor viscosidad, genera mayor fricción alrededor de la aguja del inyector (figura 2), que produce un movimiento lento, con un mayor retraso de inyección [47]. Murillo et al. [48] revelaron que la eficiencia térmica del freno alimentado con biodiésel es más baja que la del diésel; señalaron que la razón puede estar relacionada con la atomización del combustible durante la inyección y la estabilidad del combustible mezclado durante la inyección, bombeo y almacenamiento.



**Fuente:** autores.

**FIGURA 2.** INYECCIÓN MULTIPUNTO: A) AIRE, B) INYECTORES



## Condiciones del biocombustible con el tiempo de inyección

Para reducir emisiones existe la opción del retraso del tiempo de inyección en el combustible (Tabla 4), el cual disminuye la eficacia en la duración de la combustión, generando una combustión incompleta, lo que ocasiona una reducción del BTE, junto con un incremento del BSFC; sin embargo, el retardar el tiempo de inyección puede ayudar a disminuir la emisión de NOx [49]; también existe la estrategia de posttratamiento, el cual tiene la finalidad de eliminar o reducir NOx por medio de catalizadores de reducción selectiva, o trampas de NOx y los no refrigerados EGR; la inyección con biodiésel puede reducir el PM con pérdida moderada de eficiencia [50].

**TABLA 4.** EL EFECTO DEL TIEMPO DE INYECCIÓN DEL BIODIÉSEL EN LA GENERACIÓN DE EMISIONES

Tipo de biodiésel	Emisión que reduce	Emisión que aumenta	Tiempo de inyección	La causa de esto	Referencia
Aceite de plástico	NOx y CO	---	Retardar la sincronización de la inyección	Se mejora el BTE	[51]
Aceite de <i>Jatropha</i>	CO, HC y Humo	NO	Tiempo avanzado de inyección	El tiempo de inyección fue generando 5 grados de ángulo del cigüeñal de fábrica	[52]
Aceite vegetal	NOx	HC y CO	Tiempo de inyección se reinicia en mezclas	Cuando el tiempo se reinicia para las mezclas de biodiésel, se reduce el NOx	[53]
Soja puro	NOx	Hollín	Retraso de tiempo de inyección	Se concluyó que tanto el retraso de tiempo de inyección como el EGR ayudan a reducir los NOx	[54]
Aceite de karanja	PM	---	Mayor presión en el avance de tiempo de inyección	Se demostró que al aumentar la presión de inyección se reduce la concentración de partículas	[55]

Continúa...

Tipo de biodiésel	Emisión que reduce	Emisión que aumenta	Tiempo de inyección	La causa de esto	Referencia
Aceite de cocina usado	NOx	CO y HC	Empleo 2 tiempos de inyección 25° y 5° BTDC	El incremento de las emisiones se debió más a la aplicación de EGR	[56]

**Fuente:** autores.

## LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN DEL MOTOR CON BIODIÉSEL

Cada combustible tiene diferentes propiedades físicas y químicas, por lo tanto, las características de combustión pueden variar, por lo que los parámetros del motor deben ajustarse a las características del combustible, y con esto lograr obtener el óptimo desempeño del motor. La relación de compresión (CR) es una de esas operaciones que afecta en gran medida el rendimiento del motor [57] (tabla 5); esto coincide con Laguitton et al. [58], quienes encontraron en su experimento que las emisiones de hollín y NOx pueden reducir al disminuir el CR en motores diésel.

**TABLA 5.** ESTRATEGIAS DEL BIODIÉSEL DE ORIGEN VEGETAL EN LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN

Tipo de biodiésel	Estrategia empleada	Conclusión obtenida	Referencias
Biodiésel de aceite vegetal	Se consideró 2 CR de 19.18 y 17	Se obtuvieron los mejores resultados en BSFC, BTE y reducción de emisiones (CO y HC) con el aumento de CR	[59]
Biodiésel de éster metílico de <i>Jatropha</i>	La prueba indica una buena combinación de RC de 18 con presión de inyección de 250 bar	Con esa combinación de RC con inyección produjo un aumento de BTE de 8.2%	[60]
Biodiésel de éster metílico de <i>Jatropha</i>	Aplicó tres presiones (150, 200 y 120 bar) con 3 RC de 16, 17 y 18	Se llegó a la conclusión de que mayor inyección, presión y mayores RC generaron a un mayor rendimiento con deterioro en algunas emisiones	[60]

Continúa...

Tipo de biodiésel	Estrategia empleada	Conclusión obtenida	Referencias
Biodiésel de aceite Mahua con diésel	Se aplicó un incremento de 10 a 20 en la RC	Con el incremento de la RC se aumentó en más del 33 % el BTE y se redujo la temperatura de EGR y el BSFC	[61]
Biodiésel de éster metílico de aceite de honge	Aplicar una RC de 17.5 en motor dual con GNC	Con esa RC ayudó a mejorar el BTE y reducir el humo, CO y HC	[62]
Biodiésel de éster metílico de aceite de palma	Balance de energía entre la RC y a sincronización de encendido	Con un balance de energía del 25 %, el resto de energía se pierde por la refrigeración (30 %) gases de escape (17 %) y el restante no se contabiliza	[63]

Fuente: autores.

### Relación de compresión con biodiésel de aceite de cocina usado

Muralidharan et al. [64] descubrieron que con la mezcla del 40 %, el aceite de cocina usado es ligeramente más alto en BTE que el diésel estándar en relaciones de compresión más altas (CR 21); esto sucede porque las mezclas de aceite de cocina usado dan mayor presión de combustión con una alta relación de compresión; esto genera un retraso más largo de encendido, la tasa máxima de aumento de presión y menor tasa de liberación de calor en comparación con el diésel [65]. De la misma manera lo señalan Kassaby y Nemitallah [66] cuando mencionan un aumento del BTE generado por el incremento de la CR en la mezcla de aceites de cocina usados como biodiésel, con un cambio de la relación de compresión de 14 a 18. En el caso de Muralidharan et al. [67], encontraron que el máximo BTE a plena carga fue de 38.46 % para un 40 % de aceite de cocina usado, que representó un 4.1% más alto que el diésel convencional, usando una relación de compresión variable de 21.

### Relación de compresión con aceites de pirolisis

Mani et al. [40] encontraron que la presión máxima del cilindro para el diésel es de 67 bares, y en el caso de residuos plásticos de petróleo, de 71 bares; esto se debe a la evaporación del aceite de plástico residual dentro del cilindro, el cual absorbe el calor de la cámara de combustión, retardando el encendido más largo. Un alto rango

de carga genera que aumente la presión del aceite. En otras palabras, este periodo representa una combustión anormal de un sistema premezclado. Sin embargo, este puede ser el comportamiento en motores de alta relación de compresión, los cuales pueden ser controlados de manera adecuada [51]; en la tabla 6 se aprecia la emisión en cuanto a la mayor presión de inyección. Sharma y Murugan [68] examinaron los efectos de variar el CR en el momento óptimo de inyección y presión de la apertura de la boquilla para el comportamiento del motor; utilizaron una mezcla de 80 % de biodiésel y 20 % de aceite obtenido de pirolisis de neumático de deshecho; el máximo BTE obtenido en el CR fue de 18.5 (con una reducción de humo), en el cual fue mayor en aproximadamente un 8 % de la CR original de 17.5. Finalmente, Ananthakumar et al. [69] usaron un 2.5 % por volumen de DEE como aditivo en una mezcla de WPO/diésel; se mostró una mejora en el rendimiento con WPO durante las pruebas experimentales pero inferior al diésel, con la relación de compresión creciente de 12 a 20.

**TABLA 6.** COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES  
RELACIONADAS CON LA PRESIÓN DE INYECCIÓN

Tipo de biodiésel	Emisión que reduce	Emisión que aumenta	Presión de inyección	La causa de esto	Referencia
Aceite de semilla de <i>Cartamo</i>	---	---	200, 215 y 20 bares	A mayor aumento de presión, mayor es la potencia y menor el BSFC	[70]
Calophyllum inophyllum	HC, CO y humo	NOx	200, 220 y 240 bares	Las reducciones de emisión se lograron a 220 bares y el BSFC se redujo	[71]
20 % aceite de maíz + 20 % de soja y el resto de diésel	---	---	180,190 y 200 bares	Encontramos que la mayor presión, provoca mejor economía de combustible y BTE	[72]
Aceite de canola	---	---	180, 200 y 240 bares	La mayor presión de inyección dio los mejores resultados de BSFC y BTE	[73]

Continúa...

Tipo de biodiésel	Emisión que reduce	Emisión que aumenta	Presión de inyección	La causa de esto	Referencia
50 % de aceite de hene, el resto de diésel	CO, HC y humo	NOx	200, 220, 240 y 250 bares	El incremento de la presión de inyección elevó el BTE	[74]
Biodiésel de Lino Linolenico	CO, HC y humo	NOx	200, 220 y 240 bares	La presión óptima fue de 240 bares, con un BTE similar al combustible diésel	[75]

**Fuente:** autores.

## CARACTERÍSTICAS DEL GOLPE EN EL MOTOR CON BIODIÉSEL

El retardo de encendido es uno de los parámetros más importantes para determinar las características de cómo se puede generar el golpeteo de los motores diésel [76]; el fenómeno del golpe en el motor depende de muchos factores como el número de cetano, la relación de compresión, la presión de inyección, tiempo de inyección y propiedades del combustible [77]; en la tabla 7 se puede observar la relación de ruido y vibración con la aplicación de bioaceites.

**TABLA 7.** RELACIÓN DEL RUIDO Y VIBRACIÓN CON BIODIÉSEL

Tipo de biodiésel	A que se le atribuye el ruido	Debido a	Referencia
Mezclas de aceites sintéticos y vegetales	El ruido se le atribuye al incremento de biodiésel (sintético y vegetal)	El incremento en el porcentaje del biodiésel y del aceite sintético produjo una diferencia en la fase de combustión, lo que generó el ruido	[78]
Mezcla de biodiésel de aceite de oliva metil éter con diésel	La mezcla con biodiésel redujo el ruido; se lo atribuyó a su alto número de cetano	La mezcla de diésel /biodiesel generó una reducción de ruido	[79]

Tipo de biodiésel	A que se le atribuye el ruido	Debido a	Referencia
Biodiésel de una mezcla de aceite de soja y canola	La vibración se le atribuye al biodiésel	Informaron que las menores vibraciones del motor se dieron con el diésel puro comparándolo con el biodiésel	[80]
Biodiésel de aceite de karanja	Se le atribuye el ruido/vibración al 20 % de biodiésel	Informaron que el 20 % de mezcla de biodiésel produce ruido/vibración, especialmente en dirección vertical	[81]
Mezcla de biodiésel de aceite vegetal con diésel y H <sub>2</sub>	La presencia del oxígeno en el combustible (diésel) reduce la vibración	Se realizaron varias mezclas de biodiésel, y el oxígeno presente en el combustible pudo contribuir a la reducción de la vibración	[82]
Biodiésel con aceite de <i>Jatropha</i>	Las vibraciones más altas se le atribuyen al diésel puro	Los resultados mostraron una reducción en el ruido y ubicación aplicando biodiésel, comparándolo con el diésel puro	[83]

**Fuente:** autores.

## FUNCIONAMIENTO DE COMBUSTIBLE PILOTO EN MOTOR DUAL

El combustible líquido, conocido como el combustible piloto, actúa como fuente de ignición [84], por lo que el combustible piloto provoca el proceso de combustión [85]. La diferencia más notable de los ésteres metílicos comparados con el diésel, es su viscosidad más alta (hasta 19.2 mm<sup>2</sup>/s, comparando con 5 mm<sup>2</sup>/s para diésel) [86]. La viscosidad del combustible piloto afecta las características de pulverización, la distribución de la llama y la combustión [87]. El diésel, el éter dimetílico y el biodiésel son los combustibles más comunes que se pueden usar como piloto [88]. La cantidad de biodiésel requerido para el encendido inicial del motor está entre el 10 y el 20 % para la ignición adecuada [89], en la tabla 8 se presenta el comportamiento del bioaceite como combustible piloto.

**TABLA 8.** COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DUAL CON EL BIOACEITE COMO COMBUSTIBLE PILOTO

Tipo de aceite	Ventajas	Desventajas	Referencia
Jjoba (semilla)	Tiene niveles de potencia comparables con el diésel y reduce el ruido	Tiene tendencia a golpes y genera mayores emisiones de CO y HC	[90]
Eucalipto	Estabilidad de la combustión y mayor presión reduce el HC, CO y CO <sub>2</sub>	El BSFC es mayor junto con el NO <sub>x</sub>	[26]
Honge éster metílico	Tiene una buena combustión	Tiene menor eficiencia en todo el rango de carga	[86]

**Fuente:** autores.

Paul et al. [91], quienes estudiaron la combustión, el rendimiento y las emisiones de mezclas de combustible piloto oxigenados, informaron que con una mayor cantidad de biodiésel y etanol en combustible piloto, aumenta su eficiencia en la combustión del motor y también disminuyen los NO<sub>x</sub>.

### Combustible de aceite piloto dual con biogás

El alto costo del biodiésel sigue siendo la principal barrera para su comercialización [92]. El hacer funcionar el motor diésel dual utilizando biodiésel y combustible gaseoso (gas natural, biogás, hidrogeno, etc.) puede ser una técnica eficiente para hacer que el uso de biodiésel sea más competitivo. En el modo dual, los combustibles gaseosos se suministran generalmente en el cilindro del colector de admisión; la mezcla resultante se comprime en el cilindro del motor como en un motor diésel ordinario. Una vez que se genera la compresión, se inyecta un pequeño porcentaje de combustible líquido con un número de cetano de alrededor de 50 (diésel o biodiésel), comúnmente denominado piloto, para acceder la mezcla de aire caliente. En general, el combustible gaseoso (combustible primario) cubre alrededor del 90 % de energía total y el resto de la energía es proporcionada por el combustible piloto [93]. Varios investigadores han confirmado una reducción de NO<sub>x</sub> y humo utilizando biogás como combustible primario y biodiésel como combustible piloto en motor CI [94], [95], sin embargo, las emisiones de HC y CO pueden llegar a ser mayores con el aumento del biogás [96].

## CONCLUSIONES

Cuando se usa la combustión dual se logra mejorar el funcionamiento del motor, y esto puede generar mejores condiciones con altas cargas. También puede ayudar una aceleración de la carga de aire en la admisión, aumentando la presión y temperatura del aire de admisión. Para el análisis en el funcionamiento del motor es importante tomar en cuenta las emisiones, así como el desempeño dentro de la combustión, por lo que una buena combustión derivada de altas relaciones de compresión puede ser considerada adecuadamente, pero a la vez debe ser limitada en función del fenómeno del golpe. El uso del biodiésel puede llegar a ser muy adecuado tanto como combustible piloto o principal (combustión dual); de acuerdo con esta investigación, se justifica la obtención y producción, siempre y cuando la materia prima se obtenga de residuos o de productos no comestibles; el adecuar las condiciones del motor de acuerdo con el desempeño del biocombustible es una tarea pendiente para futuros proyectos de investigación.

## REFERENCIAS

- [1] M.F. Othman, A. Abdullah, G. Najafi y M. Rizalman. “Green fuel as alternative fuel for diesel engine: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 694-709, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.140>.
- [2] R.D. Lanjekar y D. Deshmukh, “A review of the effect of the composition of biodiesel on NOx emission, oxidative stability and cold flow properties”, *Renew Sustain Energy Rev*: 54, pp.1401-11, 2016.
- [3] A. Hansen, M. Gratton y W. Yuan, “Diesel engine performance and NOx emissions from oxygenated biofuels and blends with diesel fuel”, *ASABE*: 49, pp. 589-95, 2006.
- [4] H. Aydin y H. Bayindir, “Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine”, *Renew Energy*: 35, pp. 588-92, 2010.
- [5] A.S. Ramadhas, C. Muraleedharan y S. Jayaraj, “Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil”, *Renew Energy*: 30:1789-800, 2005.
- [6] P. Ni, X. Wang, Z. Wang, G. Mao y S. Wei, “Numerical modelling of soot and NOx emissions of a diesel/methanol dual fuel engine”, en *Proceedings of international conference on computer distribution control and intelligent environmental monitoring*, Changsha, China; 19-20 de febrero, pp. 483-6, 2011.
- [7] M.W. Menelik y S. Niranjana, “Effect of fuel preheating with blended fuels and exhaust gas recirculation on diesel engine operating parameters”, *Renewable Energy Focus*, vol. 26, pp. 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.07.003>, 2018.



- [8] J.B. Hirkude y A.S. Padalkar, “Performance and emission analysis of a compression ignition: engine operated on waste fried oil methyl esters”, *Appl Energy*, vol. 90, n°. 1, pp. 68-72, 2012
- [9] S. Kumar, R. Prakash, S. Murugan y R.K. Singh, “Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine”. *Energy Convers Manage*: 74, pp. 323-31, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.028>.
- [10] B.P. Anand, C.G. Saravanan y C.A. Srinivasan, “Performance and exhaust emission of turpentine oil powered direct injection diesel engine”, *Renew Energy*, vol. 35, n°. 6, pp. 1179-84, 2010.
- [11] K. Pramanik, “Properties and use of Jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine”, *Int. J. Renew. Energy*: 28, pp. 239e248, 2003.
- [12] D.K. Ramesha, G.P. Kumara, Lalsaheb, A.V.T. Mohammed, H.A. Mohammad y M.A. Kasma, “An experimental study on usage of plastic oil and B2O algae biodiesel blend as substitute fuel to diesel engine”, *Environ Sci Pollut Res*, vol. 23, n°. 10, pp. 9432-9, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5981-6>.
- [13] Kumar, Lakshya Garg, Rohit Kumar y S.K. Mohapatra, “Performance Parameters of Dual Fuel Diesel Engine using Eucalyptus – Producer Gas as Secondary Fuel”, *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, vol. 2 (Special Issue), pp. 15-22, 2015.
- [14] C. Güngör, H. Serin, M. Özcanlı, S. Serin y K. Aydın, “Engine performance and emission characteristics of plastic oil produced from waste polyethylene and its blends with diesel fuel”, *Int J Green Energy*, vol. 12, n°. 1, pp. 98-105, 2014. <http://dx.doi.org/10.1080/15435075.2014.893873>.
- [15] B. Dhinesh, I.J. Ramesh Lalvani, M. Parthasarathy y K. Annamalai, “An assessment on performance, emission and combustion characteristics of single cylinder diesel engine powered by Cymbopogon flexuosus biofuel”, *Energy Convers Manage*: 117, pp. 466-74, 2016.
- [16] N. Prakash, A. Jose, M.G. Devanesan, T. Viruthagiri, “Optimization of Karanja oil transesterification”, *Indian Journal of Chemical Technology*: 13, pp. 505-509, 2006.
- [17] Ö. Can, E. Öztürk, H. Solmaz, F. Aksoy, C. Çınar y H.S. Yücesu, “Combined effects of soybean biodiesel fuel addition and EGR application on the combustion and exhaust emissions in a diesel engine”, *Appl. Therm. Eng*: 95, pp. 115-124, 2016.
- [18] B.B. Sahoo, N. Sahoo y U.K. Saha, “Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines—A critical review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13 (Issues 6-7), pp. 1151-1184, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.003>.

- [19] Z. Zhang, E. Jiaqiang, D. Yuanwang, M. Pham, W. Zuo, Q. Peng y Z. Yin. “Effects of fatty acid methyl esters proportion on combustion and emission characteristics of a biodiesel fueled marine diesel engine”, *Energy Conversion and Management*, vol. 159, pp. 244-253, 2018., <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.098>.
- [20] M.M. Roy, W. Wang y M. Alawi. “Performance and emissions of a diesel engine fueled by biodiesel –diesel, biodiesel –diesel-additive and kerosene–biodiesel blends”, *Energy Convers Manag*: 84, pp. 164-73, 2014.
- [21] H.K. Rashedul, H.H. Masjuki, M.A. Kalam y M.A. Ashraful. “Performance and emission of a CI engine using antioxidant treated biodiesel”, *J Clean Energy Technol*: 5, pp. 6-10, 2017.
- [22] K. Cacua, A. Amell y F. Cadavid, “Effects of oxygen enriched air on the operation and performance of a diesel-biogas dual fuel engine”, *Biomass Bioenergy*: (45), pp. 159-167, 2012.
- [23] N. Miyamoto, H. Ogawa, N. Nurun, K. Obata y K.T. Arima, “Smokeless low NOx, high thermal efficiency and low noise diesel combustion with oxygenated agents as main fuel”, *SAE Paper 980506*, 1988.
- [24] V. Balasubramanian, K. Sridhara y V. Ganesan, “Performance evaluation of a small agricultural engine operated on dual fuel (diesel + natural gas) system”, *SAE technical paper 951777*, 1995.
- [25] A. Corsini, A. Marchegiani, F. Rispoli, F. Sciulli, P. Venturini, “Vegetable oils as fuels in diesel engine, engine performance and emissions”, *Energy Procedia*: (81), pp. 942e949, 2015.
- [26] L. Tarabet, K. Loubar, M.S. Lounici, K. Khiari, T. Belmrabet y M. Tazerout, “Experimental investigation of DI diesel engine operating with eucalyptus biodiesel / natural gas under dual fuel mode”, *Fuel*: (133), pp. 129-38, 2014.
- [27] X. Zhang, J-y Wu y J. Niu, “PCM-in-water emulsion for solar thermal applications: the effects of emulsifiers and emulsification conditions on thermal performance, stability and rheology characteristics”, *Sol Energy Mater Sol Cells*: 147, pp. 211-24, 2016.
- [28] K. John y D.B. Diana, “Analysis of knock in a dual-fuel engine”, *SAE 922367*, 1992.
- [29] S. Satbir, S.C. Kong, D.R. Rolf, R.K. Sundar y K.C. Midkiff, “Modeling and experiments of dual-fuel engine combustion and emissions”, *SAE 2004-01-0092*, 2004.
- [30] J. Kusaka, K.I. Tsuzuki, Y. Daisho y T. Saito, “A numerical study on combustion and exhaust gas emissions characteristics of a dual fuel natural gas engine using a multi-dimensional model combined with detailed kinetics”, *SAE 2002-01-1750*, 2002.

- [31] M.Y.E. Selim, “Sensitivity of dual fuel engine combustion and knocking limits to gaseous fuel composition”. *Energy Convers Manage*: 45, pp. 411-425, 2004.
- [32] G.H. Abd Alla, H.A. Soliman, O.A. Badr y M.F. Abd Rabbo, “Effect of injection timing on the performance of a dual fuel engine”, *Energy Convers Manage*: 43, pp. 269-77, 2002.
- [33] M. Ishida, T. Tagai, H. Ueki y D. Sakaguchi, “Ignition and combustion characteristics of methanol mixture in a dual fuel diesel engine”, en *Proceedings of the COMODIA*, Japan; 2004.
- [34] M.Y.E. Selim, “Effect of exhaust gas recirculation on some combustion characteristics of dual fuel engine”. *Energy Convers Manage*: 44, pp.709-23, 2003.
- [35] K. Hamasaki, E. Kinoshita, H. Tajima, K. Takasaki y D. Morita, “Combustion characteristics of diesel engines with waste vegetable oil methyl ester”, en *Proceedings of the 5th international symposium on diagnostics and modeling of combustion in internal combustion engines* (COMODIA 2001), 2001.
- [36] S.C.A. De Almeida, C.R. Belchior, M.V.G. Nascimento, L.R. Vieira y G. Fleury, “Performance of a diesel generator fuelled with palm oil”, *Fuel*: (81), pp. 2097e2102, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00155-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00155-2)
- [37] D.H. Qi, H. Chen, L.M. Geng y Y.Z. Bian, “Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel / diesel blends”. *Energy Convers Manag*, vol. 51, n°. 12, pp. 2985-92, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.042>.
- [38] D. Liu, A. Ghafourian y H. Xu, “Phenomenology of EGR in a Light Duty Diesel Engine Fuelled with Hydrogenated Vegetable Oil (HVO), Used Vegetable Oil Methyl Ester (UVOME) and Their Blends”, *SAE Technical paper* 2013-01-1688, 2013. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1688>.
- [39] A.K. Panda, S. Murugan y R.K. Singh, “Performance and emission characteristics of diesel fuel produced from waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste polypropylene”, *Energy Sources, Part A: Recover Util Environ Eff*, vol. 38, n°. 4, pp. 568-76, 2016.
- [40] M. Mani, G. Nagarajan y S. Sampath, “Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine”, *Energy*, vol. 36, n°. 1, pp. 212-9, 2011.
- [41] V.K. Kaimal y P. Vijayabalan, “A detailed study of combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil and its blends”, *Energy Convers Manage*: 105, pp. 951-6, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.043>.

- [42] A.S. Ayodhya, T.V. Lamani, P. Bedar y G.N. Kumar. “Effect of exhaust gas recirculation on a CRDI engine fueled with waste plastic oil blend”, *Fuel*, vol. 227, pp. 394-400, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.128>.
- [43] S.V. Khandal, N.R. Banapurmath, V.N. Gaitonde y S.S. Hiremath. “Paradigm shift from mechanical direct injection diesel engines to advanced injection strategies of diesel homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines- A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 369-384, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.058>.
- [44] B. Ashok, K. Nanthagopal, B. Saravanan, P. Somasundaram, C. Jegadheesan, B. Chaturvedi, S. Sharma y G. Patni. “A novel study on the effect lemon peel oil as a fuel in CRDI engine at various injection strategies”, *Energy Conversion and Management*, vol. 172, pp. 517-528, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.037>.
- [45] B. Tesfa, R. Mishra, F. Gu y N. Powles, “Prediction models for density and viscosity of biodiesel and their effects on fuel supply system in CI engines”, *Renew Energy*: 35, pp. 2752-60, 2010.
- [46] A.E. Atabani, A.S. Silitonga, I.A. Badruddin, T.M.I. Mahlia, H.H. Masjuki y S. Mekhilef, “A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics”, *Renew Sustain Energy Rev*: 16, pp. 2070-93, 2012.
- [47] X. Wang, Z. Huang, O.A. Kutu, W. Zhang y K. Nishida, “Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure”, *Int J Heat Fluid Flow*: 31, pp. 659-66, 2010.
- [48] S. Murillo, J.L. Míguez, J. Porteiro, E. Granada y J.C. Morán. “Performance and exhaust emissions in the use of biodiesel in outboard diesel engines”, *Fuel*: 86, pp. 1765-71, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.11.031>
- [49] B. Ashok, K. Nanthagopal, R. Thundil Karuppa Raj, J. Pradeep Bhasker y D. Sakthi Vignesh, “Influence of injection timing and exhaust gas recirculation of a Calophyllum inophyllum methyl ester fuelled CI engine”, *Fuel Processing Technology*, vol. 167, pp. 18-30, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.06.024>.
- [50] J.J. Hernández, M. Lapuerta y J. Barba, “Effect of partial replacement of diesel or biodiesel with gas from biomass gasification in a diesel engine”, *Energy*, vol. 89, pp. 148-157, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.050>.
- [51] M. Mani y G. Nagarajan, “Influence of injection timing on performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine running on waste plastic oil”, *Energy*, vol. 34, n°. 10, pp. 1617-23, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.010>.
- [52] T. Ganapathy, R.P. Gakkhar y K. Murugesan, “Influence of injection timing on performance, combustion and emission characteristics of Jatropha biodiesel engine”, *Appl. Energy*: (88), pp. 4376-4386, 2011.

- [53] S.A. Rahman, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, A. Sanjid y M.J. Abedin, “Assessment of emission and performance of compression ignition engine with varying injection timing”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*: 35, pp. 221–230, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.049>.
- [54] D. Qi, M. Leick, Y. Liu y F.L. Chia-fon, “Effect of EGR and injection timing on combustion and emission characteristics of split injection strategy DI-diesel engine fueled with biodiesel”, *Fuel*, vol. 90, n.º. 5, pp.1884-1891, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.016>.
- [55] A.K. Agarwal, A. Dhar, D.K. Srivastava, R.K. Maurya y A.P. Singh. “Effect of fuel injection pressure on diesel particulate size and number distribution in a CRDI single cylinder research engine”, *Fuel*: 107, pp. 84-9, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.077>.
- [56] J. Hwang, D. Qi, Y. Jung y C. Bae, “Effect of injection parameters on the combustion and emission characteristics in a common-rail direct injection diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel”, *Renew Energy*: 63, pp. 9-17, 2014.
- [57] J.B. Heywood, “Internal combustion engines”, New Delhi, India: Tata McGraw-Hill. Education Private Limited; 2013.
- [58] O. Laguitton, C. Crua, T. Cowell, M.R. Heikal y M.R. Gold, “The effect of compression ratio on exhaust emissions from a PCCI diesel engine”, *Energy Convers Manage*, vol. 48, n.º. 11, pp. 2918–24, 2007.
- [59] C. Sayin y M. Gumus, “Impact of compression ratio and injection parameters on the performance and emissions of a DI diesel engine fueled with biodiesel blended diesel fuel”, *Appl Therm Eng*, vol. 31, n.º 16, pp. 3182-8, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.05.044>.
- [60] S. Jindal, B.P. Nandwanaa, N.S. Rathore y V. Vashistha, “Experimental investigation of the effect of compression ratio and injection pressure in a direct injection diesel engine running on Jatropha methyl ester”, *Appl. Therm. Eng*, vol. 30, n.º. 5, pp. 442-448, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.10.004>.
- [61] H. Raheman y S.V. Ghadge. “Performance of diesel engine with biodiesel at varying compression ratio and ignition timing”, *Fuel*, vol. 87, n.º. 12, pp. 2659-2666, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2008.03.006>.
- [62] R.S. Hosmath, N.R. Banapurmath, S.V. Khandal, V.N. Gaitonde, Y.H. Basavarajappa y V.S. Yaliwal. “Effect of compression ratio, CNG flow rate and injection timing on the performance of dual fuel engine operated on honge oil methyl ester (HOME) and compressed natural gas (CNG)”, *Renewable Energy*: 93, pp. 579-90, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.010>.

- [63] B.K. Debnath, B.J. Bora, N. Sahoo y U.K. Saha, “Influence of Emulsified Palm Biodiesel as Pilot Fuel in a Biogas Run DFDE”, *J Energy Eng*, ASCE, 2013. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000163](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000163) A4014005-9.
- [64] K. Muralidharany D. Vasudevan, “Performance, emission and combustion characteristics of a variable compression ratio engine using methyl esters of waste cooking oil and diesel blends”, *Appl. Energ.*: (88), pp. 3959-3968, 2011. doi:10.1016/j.apenergy.2011.04.014.
- [65] K. Sivaramakrishnan, “Investigation on performance and emission characteristics of a variable compression multi fuel engine fuelled with Karanja biodiesel –diesel blend”, *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 27 (Issue 2), pp. 177-186, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.03.001>.
- [66] M. Kassaby y M.A. Nemitallah, “Studying the effect of compression ratio on an engine fueled with waste oil produced biodiesel /diesel fuel”, *Alex. Eng. J.* vol. 52, n°. 1, pp. 1-11, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2012.11.007>.
- [67] K. Muralidharan, D. Vasudevan y K.N. Sheeba, “Performance, emission and combustion characteristics of a variable compression ratio engine”, *Energy*: (36), pp. 5385–5393, 2011.
- [68] A. Sharma y S. Murugan, “Potential for using a tyre pyrolysis oil-biodiesel blend in a diesel engine at different compression ratios”, *Energ. Conv. Manag.*: (93), pp. 289–297, 2015. doi:10.1016/j.enconman.2015.01.023.
- [69] S. Ananthakumar, S. Jayabal y P. Thirumal, “Investigation on performance, emission and combustion characteristics of variable compression engine fuelled with diesel, waste plastics oil blends”, *J Braz Soc Mech Sci Eng*, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-016-0518-6>.
- [70] H. Ögüt, H. Oğuz y F. Aydın, “The effect of engine performance of different injector pressure at safflower oil biodiesel fuel”, *Journal of Agricultural Machinery Science*, vol. 9, n°. 2, pp. 93-97, 2013.
- [71] K. Nanthagopal, B. Ashok y R. Thundil Karuppa Raj, “Influence of fuel injection pressures on Calophyllum inophyllum methyl ester fuelled direct injection diesel engine”, *Energy Convers. Manag.*: (116), pp. 165-173, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.002>.
- [72] M.S. Shehata, A.M. Attia y S.A. Razek, “Corn and soybean biodiesel blends as alternative fuels for diesel engine at different injection pressures”, *Fuel*: (161), pp. 49-58, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.08.037>.
- [73] C. Sayin, M. Gumus y M. Canakci, “Effect of fuel injection pressure on the injection, combustion and performance characteristics of a DI diesel engine fueled with canola oil methyl esters-diesel fuel blends”, *Biomass Bioenergy*, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.07.016>.

- [74] K.V. Belagur y R.V. Chitimini, “Effect of injector opening pressures on the performance, emission and combustion characteristics of DI diesel engine running on honne oil and diesel fuel blend”, *Thermal Science*, vol. 14, n°. 4, pp. 1051-1061, 2010.
- [75] S. Puhan, R. Jegan, K. Balasubbramanian y G. Nagarajan, “Effect of injection pressure on performance, emission and combustion characteristics of high linolenic linseed oil methyl ester in a DI diesel engine”. *Renewable Energy*: 34, pp. 1227-33, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.001>
- [76] S. Jaichandar y K. Annamalai, “Influences of re-entrant combustion chamber geometry on the performance of Pongamia biodiesel in a DI diesel engine”, *Energy*, vol. (Issue 1), pp. 633-640, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.05.029>.
- [77] R.P. Rodriguez, R. Sierens y S. Verhelst, “Ignition delay in a palm oil and rapeseed oil biodiesel fuelled engine and predictive correlations for the ignition delay period”, *Fuel*, vol. 90, n°, 2, pp. 766-72, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.10.027>.
- [78] A.J. Torregrosa, A. Broatch, B. Plá y L.F. Mónico, “Impact of Fischer-Tropsch and biodiesel fuels on trade-offs between pollutant emissions and combustion noise in diesel engines”, *Biomass Bioenergy*: (52), pp. 22-33, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.004>.
- [79] M.D. Redel-Macías, S. Pinzi, D. Leiva, A.J. Cubero-Atienza y M.P. Dorado, “Air and noise pollution of a diesel engine fueled with olive pomace oil methyl ester and petrodiesel blends”, *Fuel*; 95, pp. 615-21, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.003>.
- [80] A. Taghizadeh-Alisarai y A. Rezaei-Asl, “The effect of added ethanol to diesel fuel on performance, vibration, combustion and knocking of a CI engine”, *Fuel*: 185, pp. 718-33, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.041>.
- [81] C. Patel, A.K. Agarwal, N. Tiwari, S. Lee, C.S. Lee y S. Park, “Combustion, noise, vibrations and spray characterization for Karanja biodiesel fuelled engine”, *Appl Therm Eng*; 106, pp. 506-17, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.025>.
- [82] E. Uludamar, S. Yildizhan, K. Aydın y M. Ozcanlı, “Vibration, noise and exhaust emissions analyses of an unmodified compression ignition engine fuelled with low sulphur diesel and biodiesel blends with hydrogen addition”, *Int J Hydrogen Energy*: 41, pp. 11481e90, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.179>.
- [83] C. Patel, N. Tiwari y A.K. Agarwal, “Noise, vibrations and combustion investigations of preheated jatropha oil in a single cylinder genset engine”, *SAE Technical Paper*; 2015, 2015-01-1668. doi:10.4271/2015-01-1668.
- [84] B. Bora y U. Saha, “Experimental evaluation of a rice bran biodiesel – biogas run dual fuel diesel engine at varying compression ratios”, *Renewable Energy*: (87), pp. 782-790, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.002>.

- [85] B.J. Bora y U.K. Saha, “Comparative assessment of a biogas run dual fuel diésel engine with rice bran oil methyl ester, pongamia oil methyl ester and palm oil methyl ester as pilot fuels”, *Renew. Energy*: (81), pp. 490-498, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.019>.
- [86] N.R. Banapurmath y P.G. Tewari, “Comparative performance studies of a 4-stroke CI engine operated on dual fuel mode with producer gas and Honge oil and its methyl ester (HOME) with and without carburetor”, *Renewable Energy April*, vol. 34, n° 4, pp. 1009e15, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.08.005>.
- [87] T. Korakianitis, A.M. Namasivayam y R.J. Crookes. “Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 37 (Issue 1), pp. 89-112, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.04.002>.
- [88] B. Yang, X. Wei, C. Xi, Y. Liu, K. Zeng y M.C. Lai, “Experimental study of the effects of natural gas injection timing on the combustion performance and emissions of a turbocharged common rail dual-fuel engine”, *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 297-304, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.030>.
- [89] I.T. Yilmaz y M. Gumus, “Investigation of the effect of biogas on combustion and emissions of TBC diesel engine”, *Fuel*, vol. 188, pp. 69-78, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.034>.
- [90] M.Y.E. Selim, M.S. Radwan y H.E. Saleh, “Improving the performance of dual fuel engines running on natural gas/LPG by using pilot fuel derived from jojoba seeds”, *Renewable Energy*, vol. 33, n° 6, pp. 1173e85, 2008. doi: 10.1016/j.renene.2007.07.015.
- [91] A. Paul, R.S. Panua, D. Debroy y P.K. Bose, “An experimental study of the performance, combustion and emission characteristics of a CI engine under dual fuel mode using CNG and oxygenated pilot fuel blends”, *Energy*: (86), pp.560-73, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.050>.
- [92] B. Amigun, F. Muller-Langer y H. Von Blottnitz, “Predicting the costs of biodiesel production in Africa: learning from Germany”, *Energy Sustain Dev*: (12), pp. 5-21, 2008. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60415-9](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60415-9).
- [93] R.G. Papagiannakis, D.T. Hountalas y C.D. Rakopoulos, “Theoretical study of the effects of pilot fuel quantity and its injection timing on the performance and emissions of a dual fuel diesel engine”, *Energy Convers Manage*: (48) pp. 2951-61, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.07.003>.
- [94] D.K. Ramesha, A.S. Bangaria, Chirag P Rathoda y R.S. Chaitanya, “Combustion, performance and emissions characteristics of a biogas fuelled diesel engine with fish biodiesel as pilot fuel”, *Biofuels*, 2015a. <https://doi.org/10.1080/17597269.2015.1036960>.



- [95] D.K. Ramesha, A.S. Bangaria, C.P. Rathoda y R.S. Chaitanya, “Experimental investigation of biogas-biodiesel dual fuel combustion in a diesel engine”, *J Middle Eur Constr Des Cars* 2015b: 13, pp. 12-20. doi:10.1515/mecdc-2015-0003.
- [96] P. Rosha, A. Dhir y S.K. Mohapatra, “Influence of gaseous fuel induction on the various engine characteristics of a dual fuel compression ignition engine: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, Part 3, pp. 3333-3349, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.055>.