



AVANCES Y ESTRATEGIAS PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DEL BIODIESEL EN MOTOR DIESEL

ADVANCES AND STRATEGIES TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF BIODIESEL IN DIESEL ENGINE

Héctor-Hugo Riojas-González^{1,*} , Liborio-Jesús Bortoni-Anzures¹ ,
 Juan-Julián Martínez-Torres¹ , Héctor A. Ruiz² 

Recibido: 19-04-2023, Recibido tras revisión: 11-05-2023, Aceptado: 29-05-2023, Publicado: 01-07-2023

Resumen

La demanda de diésel en vehículos pesados se incrementa cada año en el mundo. El posible uso de combustibles alternativos como el biodiésel tiene algunas desventajas como el menor valor calorífico y su mayor viscosidad, por esta razón se requiere mejorar sus propiedades, optimizando el comportamiento de la combustión en el motor y en la reducción de las emisiones. El objetivo del trabajo de investigación es explorar las diferentes mezclas que puedan ayudar a mejorar el uso del biodiésel a través de las estrategias y avances que se han generado con el propósito de beneficiar el desempeño del motor diésel. Entre las distintas estrategias de mejoramiento del biodiésel están las mezclas de distintos bioaceites (aceites vegetales, de pirólisis y usado de cocina), mezclas del biodiésel con alcohol, con hidrógeno, el biodiésel como combustible piloto, las emulsiones del biodiésel con agua y la aplicación del biodiésel con antioxidantes, nanotubos y nanopartículas. Se concluye que para poder usar actualmente el biodiésel se lo haría con la combustión dual, en donde este representaría el combustible piloto (10 % o 20 % del combustible total del motor). Con esta estrategia se puede impulsar a otros combustibles (líquidos y gaseosos) en la combustión dual, para que con el paso del tiempo se encuentre la mezcla óptima que sea la mejor opción para el motor diésel.

Palabras clave: biodiésel, motores, mezclas, aceites, combustión dual, emulsiones

Abstract

The demand for diesel utilization in heavy-duty vehicles continues to increase worldwide. However, the potential use of alternative fuels such as biodiesel has disadvantages, such as lower calorific value and higher viscosity. For this reason, it is necessary to improve its properties to optimize combustion in the engine and reduce emissions. This research explores the various blends that can improve biodiesel utilisation through strategies and advancements that optimize diesel engine performance. Among the various strategies to improve biodiesel, we find the mixtures of different bio-oils (vegetable oils, pyrolysis oils, and used cooking oils), blends of biodiesel with alcohol and hydrogen, the use of biodiesel as a pilot fuel, emulsions of biodiesel with water, and the application of antioxidants, nanotubes, and nanoparticles to biodiesel. It is concluded that currently, biodiesel can be used through the dual combustion technique, where it acts as a pilot fuel representing 10% or 20% of the total fuel in the engine. This strategy allows for the promotion of other fuels (liquids and gases) in dual combustion to find the optimal blend that is the best option for the diesel engine.

Keywords: Biodiesel, engines, mixtures, oils, dual combustion, emulsions

^{1,*}Universidad Politécnica de Victoria, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

Autor para correspondencia ✉: hriojasg@upv.edu.mx

²Grupo de Biorrefinería, Departamento de Investigación en Alimentos, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México.

Forma sugerida de citación: Riojas-González, H. H.; Bortoni-Anzures, L. J.; Martínez-Torres, J. J. y Ruiz, H. A. "Avances y estrategias para mejorar el desempeño del biodiésel en motor diésel," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 30, pp. 90-105, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.08>.

1. Introducción

La demanda del combustible más usado para vehículos pesados es el diésel, su demanda aumentará en un 85 %, mientras que la de la gasolina caerá aproximadamente un 10 % durante el periodo 2010-2040 [1]. Por lo que la creciente demanda de energía de transporte está dirigida a los motores diésel [2]. Desafortunadamente, el sector de transporte mundial es uno de los principales responsables de la contaminación del medioambiente, genera el 26 % de las emisiones de gases de efecto invernadero [3]. Los biocombustibles son considerados combustibles neutros de carbono, el CO₂ producido por los biocombustibles es fácilmente secuestrado por cultivos de plantas mediante la fotosíntesis. Entre los biocombustibles se encuentra el biodiésel, el cual tiene un menor contenido energético comparándolo con el diésel, esto es debido a que el primero tiene mayor densidad, viscosidad, consumo de combustible específico del freno y mayores emisiones de NO_x. Todo esto no ayuda al biodiésel para superar estas limitaciones.

La aplicación de los aditivos a base de metales, aditivos oxigenados, antioxidantes, desarrolladores de cetano, lubricantes y optimizadores de propiedad de flujo en frío, ayudan a mejorar las propiedades del

biodiésel, además de la adición de alcohol [4] y la mezcla de diésel-alcohol con biodiésel generan como resultado el diésterol. En la búsqueda de mejorar las propiedades del biodiésel, muchos investigadores han adoptado diversos métodos como la transesterificación (Figura 1), calentamiento de aceite, emisión con alcohol y mezclas con diésel o con otros combustibles alternativos [5], incluso hasta se ha llegado a la obtención de un diésel renovable que, a diferencia del biodiésel, se puede obtener a partir de lípidos (aceite o grasa) como materia prima por reacción de hidrooxigenación a temperatura y presión elevadas con la presencia de un catalizador [6]. El objetivo de esta investigación es explorar las diferentes mezclas que puedan ayudar a mejorar el uso del biodiésel a través de algunas estrategias y avances que se han generado con el propósito de beneficiar el desempeño del motor diésel. El punto más crítico para la obtención del biodiésel es la materia prima.

2. Mezclas con distintos aceites

Existen varios autores que recomiendan mezclas de distintos aceites (Tabla 1).

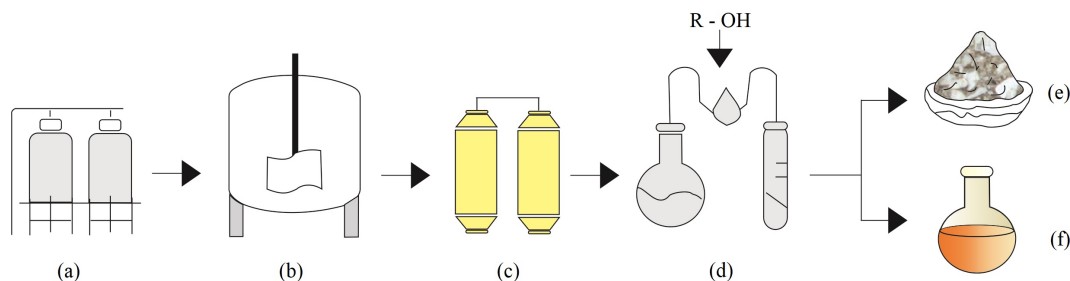


Figura 1. Proceso de transesterificación; (a) catalizador, (b) reactor con aceite, (c) acondicionamiento, (d) purificación, (e) sales y (f) biodiésel

Tabla 1. Rendimiento del motor diésel con distintos bioaceites comparándolos con el diésel convencional

Tipo de bioaceite	Tipo de rendimiento	Comentarios	Ref.
Soja éster metílico (SME) y éster metílico de la grasa amarilla (YGME)	Se aumentó el BSFC de YGME (12.2 %) y GME (12.9 %).	Ambos tienen menor valor calorífico, pero buena oxigenación que genera mejor combustión.	[7]
Aceite de semilla de <i>Pithecellobium</i>	Aumentó el BSFC.	Se generó menor presión en el cilindro, velocidad de liberación de calor y temperatura de escape.	[8]
Aceites de cáscara de naranja	Mejoró el BTE en plena carga.	Las reducciones causadas por la baja viscosidad de aceite mejoran el proceso de combustión completa.	[9]
Aceite de PODE	Mejoró el BTE por el tipo de aceite.	Por la alta proporción de mezcla del aceite con el diésel.	[10]

Tipo de bioaceite	Tipo de rendimiento	Comentarios	Ref.
Aceite de palma	Se redujo la potencia de salida y aumento el BSFC.	El aceite con EGR provocó que la tasa de liberación disminuya y genere menos reacciones químicas entre el combustible y el oxígeno.	[11]
JOME	Aumentó el BTE y disminuyó el BSFC.	Con el aumento de EGR mejoró el rendimiento del motor en general.	[12]
Aceite de Mahua	El BSFC aumentó y el BTE disminuyó.	La disminución de la eficiencia en el motor se incrementaba si se aumentaba la mezcla de biodiésel.	[13]

Está el caso de Vallinayagam *et al.* [14], quienes determinaron que una mezcla del 50 % de Kapok Metil Ester (KME) y un 50 % de aceite de pino son óptimos en términos de rendimiento y emisiones en donde se registró una reducción de HC, humo y CO, sin embargo, el BTE de la mezcla fue inferior al diésel con poca carga, pero esta fue muy similar al diésel en carga alta. De acuerdo con Singh *et al.* [15], una mezcla de 70 % de aceite de Aamla y 30 % de aceite de eucalipto generan una mezcla óptima, ya que reducen emisiones de CO, HC y humo, mientras que el NO_x es equivalente al diésel.

Otra mezcla de aceites lo registran Kasiraman *et al.* [16], recomiendan una mezcla del aceite de cáscara

de anacardo al 70 % mezclado con un 30 % de aceite de alcanfor, muestran resultados alentadores, pero sigue siendo inferior al diésel. Otra mezcla de aceites lo presentan Dubey y Gupta [17], en donde recomiendan una mezcla del 50 % de Jatropha y 50 % de aceite de trementina. Esta mezcla generó los mejores resultados comparada con otras muestras en donde hubo una reducción de NO_x, CO, HC y humo frente al diésel en condiciones a plena carga. Finalmente, Sharma y Murugan [18] encontraron que la mezcla óptima se puede dar con un 20 % de aceite de pirólisis de llanta y con un 80 % de aceite de Jatropha. En la Tabla 2 se muestran las propiedades fisicoquímicas del biodiésel.

Tabla 2. Propiedades técnicas de diversos tipos de biodiésel

Tipo de biodiésel	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad a 40 °C, cSt	Punto de inflamación (°C)	Número de cetano	Valor calorífico (MJ/k)	Ref.
Aceite de pino	875,1	1,3	52	11	42,8	[14]
Aceite de pirólisis	–	3,35	58	28	38,1	[18]
Aceite de naranja	816	3,52	74	47	34,6	[9]
Aceite de mahua	960	24,58	232	–	36,1	[13]
Aceite de soja	885	4,11	–	47,1	38,4	[19]
Aceite de cocina usado	871	5,28	–	51	37,5	[20]
Aceite de colza	886	6,18	–	59,3	40,8	[21]
Aceite de pongamia	870	6,79	–	> 48	38,8	[22]
Aceite de ceiba pentandra	880	1,9-6,0	–	47	–	[23]
Aceite de Jatropha	874,3	4,34	130	52,7	42,67	[24]
Aceite de girasol	880	4,3	148	54	40,76	[25]
Aceite de salvado de arroz	880	–	–	56,3	39,54	[26]
Aceite de palma	870	–	–	56,5	38,84	[26]

3. Mezcla de biodiésel con alcohol

La alta viscosidad, baja volatilidad y pobres propiedades de flujo en frío del biodiésel afectan la calidad de combustión [19]. Sin embargo, las propiedades pueden mejorarse mezclándolo con alcoholes [27]. Las mezclas del combustible del diesterol (compuesto de diésel, biodiésel y etanol) han demostrado mayor eficiencia, rendimiento y menores emisiones, esto se debe

a que el etanol tiene un alto valor calorífico y baja densidad en comparación con el biodiésel por lo que lo compensa [28].

De la misma manera, el etanol tiene baja viscosidad y buenas propiedades de flujo en frío, por lo que la mezcla con biodiésel ayuda a que este último disminuya su viscosidad, aumentando su volatilidad y logrando mejorar sus propiedades de flujo en frío [29]. En la Tabla 3 se presenta la mezcla del etanol con

biodiésel y sus emisiones. Además, el mayor contenido de oxígeno del etanol puede reducir más la emisión de PM en su mezcla con el biodiésel [20]. El alto número de cetano de biodiésel compensa con el bajo número de cetano del etanol, por lo que, en consecuencia, mejora la combustión del motor [21].

La presencia del biodiésel en la mezcla de etanol y diésel aumenta el índice de cetano y mejora la calidad

de autoignición de la mezcla [30]. Por otra parte, agregar etanol a la mezcla de biodiésel-diésel mejora las propiedades físicas generales como las características de evaporación y el tamaño de gota de la mezcla de combustible [22]. En las Tablas 4 y 5 se muestran las mezclas de biodiésel con alcoholes en el desempeño del motor.

Tabla 3. La generación de emisiones con la mezcla de biodiésel con etanol

Emisión que reduce	Comentarios	Ref.
NO _x	Se puede reducir las emisiones con la mezcla biodiésel-etanol.	[31]
CO, NO _x y humo	La reducción se debió a la mezcla en comparación con el biodiésel puro. La mezcla tiene mayor tasa máxima de liberación de calor y máxima presión en el cilindro en comparación al biodiésel puro.	[32]
PM y NO _x	El diesterol reduce el BSFC, la presencia del etanol es un oxidante para el hollín.	[20]
HC, CO y hollín	Con el diesterol genera un alto calor de vaporización, pero al mismo tiempo reduce el NO _x .	[33]
NO _x		[34]

Tabla 4. La generación de emisiones en la mezcla de biodiésel con alcoholes

Emisión que reduce	Tipo de alcohol	La causa de esto	Ref.
PM	Butanol	Se aumentó el BTE con una adición del 20 % de butanol con el biodiésel.	[35]
CO y HC	Butanol y pentanol	El pentanol tuvo mejor rendimiento del motor mezclado con biodiésel.	[23]
NO _x y hollín	n-Butanol	La mayor presión de inyección de butanol mezclado con biodiésel es una técnica viable.	[36]
NO _x	DME	La tasa de presión máxima de liberación de calor disminuye con la mezcla de biodiésel con DME.	[37]
PM	n-Petanol	El pentanol mezclado con biodiésel reduce las emisiones de partículas de manera dramática.	[38]
NO _x , HC y CO	1-Petanol	La mezcla reduce las emisiones con una pequeña pérdida de BTE.	[39]
CO y HC	1-Octanol	La adición de n-octanol mejora el BTE, pero aumenta el NO _x .	[40]

Tabla 5. La generación de emisiones en la mezcla de biodiésel con alcoholes

Composición de la mezcla	Emisión que reduce	Rendimiento del motor	Ref.
Diésel al 70 %, aceite de Jatropha al 20 %, etanol al 10 % y adición de 25 ppm de nanopartículas de Al ₂ O ₃	HC, CO, NO _x y humo	La presión máxima del cilindro y el calor máximo de la tasa de liberación se alcanzó más cerca de TDC.	[24]
Diésel al 40 %, 40 % de biodiésel, 10 % de aceite vegetal y 10 % de propanol	NO _x	La mezcla tuvo la mayor BSFC y menor NO _x , pero causó un aumento en CO y HC.	[41]
Mezcla de diésel, biodiésel de girasol residual, n-pentanol y n-hexanol	Varios	Además, se adicionó el n-heptanol y mejoró los valores de BTE y BSFC.	[42]
Mezcla del 5 % de DEE el resto de biodiésel de aceite de soja y diésel	CO	Mejoró la BSFC, sin embargo, si se le agregan más del 40 % de DEE, el motor podría sufrir una detonación.	[43]
20 % de etanol y 80 % de biodiésel de aceite de girasol	CO y NO _x	Con la mezcla se tuvo una mayor eficiencia térmica y si se usa con baja velocidad se incrementa el NO _x .	[25]

Otra mezcla del biodiésel puede ser con alcoholes superiores de cadena larga, como el caso del butanol y el pentanol; se puede mezclar con biodiésel (hasta un 20 %) y diésel en motor diésel sin alteraciones [44]. Como lo mencionan Babu *et al.* [44], en donde concluyeron que hasta un 29 % se puede agregar butanol mezclado con biodiésel sin que se genere ningún tipo de modificación al motor, logrando con esto, mejorar las propiedades del biodiésel y con esto beneficiar una mejor combustión de las mezclas.

4. Mezcla de biogás con biodiésel

En la combustión dual se puede usar biogás como combustible principal y biodiésel como combustible piloto. Sahoo [45] estudió el rendimiento del biogás en combustión dual, generando un BTE de 16.8 % y 16.1 % para diésel y biodiésel de Jatropha, respectivamente, en comparación con el 20.9 % del modo diésel convencional. Luijten y Kerkhof [46] analizaron un biogás sintético (variación de CO₂ del 30 al 60 %), con un motor diésel de un solo cilindro de aspiración natural alimentado de biodiésel de Jatropha como combustible piloto; reportaron una pequeña variación en BTE del motor con un aumento de energía de biogás con altas cargas, mientras que con bajas cargas el

biogás resultó con una disminución significativa del BTE. En la Tabla 6 se muestra el comportamiento del motor con la mezcla de biodiésel, alcohol y biogás.

5. Aplicación de bioaceite con agua

El combustible emulsionado de agua en biodiésel (Figura 2) podría ser la principal contribución en la reducción de NO_x y PM [47], de igual manera se reduce el humo, pero el consumo de combustible, el CO y HC se incrementan [48]. El combustible en emulsión da menor desgaste y fricción, esta reducción puede ser correlacionada con la presencia de agua, la cual provoca una baja temperatura y con esto disminuye el desgaste de la combustión [49]. La emulsión de agua aumenta el BTE, ya que la eficiencia de la combustión mejora la atomización y evaporación del combustible, formando una microexplosión, la cual genera una formación de aerosol, fino logrando una mayor vaporización del combustible. El frenado continuo de las gotas de agua en el proceso de emulsión aumenta la superficie de evaporación y garantiza la mezcla precisa, como resultado se mejora la reacción y la eficiencia de combustión [50]. En la Tabla 7 se presentan resultados en la aplicación de emulsiones con biodiésel.

Tabla 6. Mezcla de combustible dual con bioaceite y alcohol con biogás

Tipo de mezcla	Emisión que reduce	Rendimiento del motor	Ref.
Biodiésel de soja como combustible piloto y biogás	Hollín	La combustión de biogás con biodiésel muestra un buen desempeño y reducción de hollín.	[51]
Éster metílico de aceite de salvado de arroz con biogás	CO y HC	El biodiésel de aceite de salvado de arroz tuvo un mejor desempeño con el biogás con relación de compresión más alta.	[26]
Biodiésel como combustible piloto con un 6 % de DEE como suplemento, el combustible principal fue el biogás	CO, HC y humo	Con la mezcla se tuvo una mejora en el rendimiento del motor y una reducción de BSFC, pero con un incremento de NO_x .	[43]

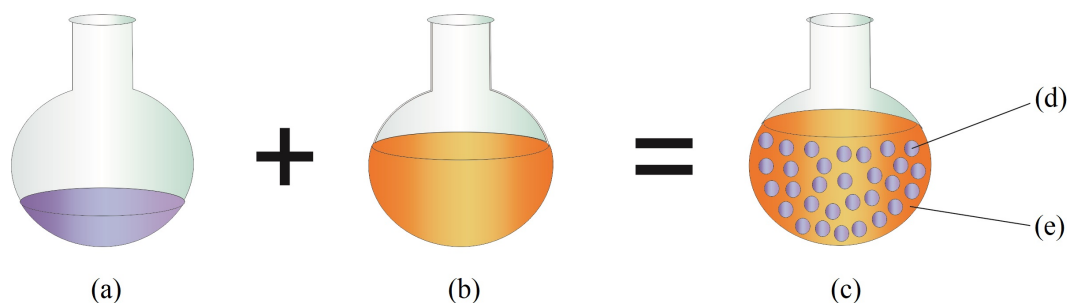

Figura 2. Fenómeno de la emulsificación: (a) 30 % agua, (b) 70 % combustible, (c) emulsión, (d) fase dispersa, (e) fase continua

Tabla 7. Aplicación de bioaceites en emulsiones

Emisión que reduce	Emisión que aumenta	Características del rendimiento del motor	Ref.
CO y humo	CO_2	Con la emulsión el BSFC y BSEC aumentaron y el BTE se mantuvo sin cambios.	[52]
NO_x y humo	CO, CO_2 y HC	El uso de microemulsiones de diestrol-agua tuvo un aumento de BSFC y redujo el BTE.	[53]
NO_x y hollín	CO	Se usó una nanoemulsión de biodiésel y generó un aumento del consumo de combustible.	[54]
NO_x	HC, CO y humo	La inyección de agua de 3 kg/h da una reducción de un 50 % de NO_x sin deterioro en el rendimiento del motor.	[55]
Humo	-	Con la emulsión de bioaceite derivado de la pirólisis de residuos de madera logró un aumento de BTE (hasta un 7.4 %).	[56]
HC y humo	-	La emulsión del aceite de pirólisis de madera y Jatropha metil éster generó un aumento de BTE (hasta un 7.3 %).	[57]

6. Mezcla de biodiésel con gas natural

El gas natural se puede usar en una combustión dual como combustible primario y el biodiésel como combustible piloto, el estudio de Paul *et al.* [58] utilizó el éster metílico de pongamia pinnata (PPME) como combustible piloto en motor CI de doble combustible en donde se le agregó gas natural, el biodiésel obtuvo una mejora en el BTE y una reducción de BSFC, la combustión fue más completa y se obtuvo una reducción CO y HC, pero con un incremento de NO_x .

Tarabet *et al.* [59] señalaron que el enriquecimiento de gas natural con H_2 en modo de combustible dual con biodiésel de eucalipto, como combustible piloto, mejora el rendimiento del motor y reduce las emisiones. El estudio de Ryu [60] realizado con aceite vegetal (fritura combustible) como combustible piloto, en un motor DI Common rail con gas natural, obtuvo como resultado una pérdida de potencia, atribuida al biodiésel por su mayor viscosidad cinemática comparada con el diésel. Otro análisis lo reportaron Senthilraja *et al.* [61], es-

tudiaron la combinación de mezclas de éster metílico de semilla con diésel-etanol y enriquecido con GNC e informaron un aumento de BSFC al momento de incrementar la concentración de la mezcla de biodiésel con etanol.

Finalmente, en los estudios experimentales realizados por Kalsi *et al.* [62], alimentaron un motor RCCI con biodiésel utilizando gas natural comprimido mezclado con hidrógeno, se tuvieron mejoras significativas en el BTE y en la reducción de humo, HC y CO.

7. Mezcla de biodiésel con hidrógeno

Como el hidrógeno es portador de energía libre de carbono, todas las emisiones basadas de carbono tales como HC, CO, H_2O , PM y humo en motores diésel de combustión dual disminuyen sustancialmente en todas las cargas [63]. El rendimiento del motor, así como el comportamiento del motor y sus emisiones, con la mezcla de biodiésel con hidrógeno, se presentan en las Tablas 8 y 9 respectivamente.

Tabla 8. Rendimiento del motor con la mezcla de biodiésel con hidrógeno

Tipo de mezcla	Rendimiento del motor	Ref.
Mezcla de biodiésel con gas H_2	La mezcla reduce la vibración del motor y reduce las emisiones de escape, pero el biodiésel tiene una tendencia del ruido.	[64]
Combustible dual con hidrógeno y biodiésel	Con la mezcla se redujo la potencia del motor de 190 g/Kwh a 104 g/Kwh, cuando se hizo el cambio de diésel a biodiésel.	[65]
Mezcla de diésel con aceite de Jatropha como biodiésel y 7 % de H_2 como combustible piloto	Con un 7 % de H_2 en la mezcla de diésel/biodiésel generó un aumento de BTE en condiciones de carga completa.	[66]
Mezcla de H_2 con biodiésel de aceite éster metílico de jojoba como combustible piloto.	Se reportó una mejora importante en la eficiencia térmica y se redujo el SFC.	[67]

Tabla 9. Comportamiento del motor y sus emisiones con la mezcla de biodiésel con hidrógeno

Emisión que reduce	Emisión que aumenta	Rendimiento del motor	Ref.
CO y HC	NO _x	Con una mezcla de biodiésel de aceite de palma y un 20 % de gas hidroxilo reduce el consumo de combustible en comparación con el biodiésel ordinario.	[68]
CO, HC y humo	NO _x	Con la mezcla de diésel y aceite de <i>Jatropha</i> como biodiésel se observó un aumento de BTE con un 10 % de H ₂ en la mezcla.	[66]
NO _x	-	Con una mezcla de 20 % de biodiésel y 80 % de diésel y un 10 % adicional de H ₂ con un rendimiento de motor estable.	[69]
CO, HC y humo	-	Con la mezcla de aceite de cocina desechado (WCO) emulsionado con H ₂ como combustible primario, la eficiencia térmica es superior a la alta potencia.	[70]
CH ₄	-	Con una mezcla del 20 % de H ₂ con biodiésel se logró reducción de emisiones.	[71]

8. Mezcla de biodiésel con antioxidantes

Varios estudios han señalado que las adiciones de antioxidantes mejoran en la reducción de emisiones, entre los antioxidantes fenólicos encontramos al TBHQ, BHA y BHT que también son comúnmente usados para controlar la degradación del combustible y de esta manera mejorar el almacenamiento del biodiésel, estos antioxidantes ayudan a la reducción de NO_x, pero pueden generar un incremento en las emisiones de humo, CO y HC [72].

De acuerdo con el estudio de Rashedul *et al.* [73], analizaron el efecto del antioxidante BHT con biodiésel de *Calophyllum* y encontraron que el BHT genera mejor estabilidad con una reducción de NO_x, mostrando una mayor potencia de frenado, mayor BTE y menor BSFC. Otro estudio comparativo entre antioxidantes en donde usaron biodiésel con aceite de soja lo llevó a cabo Ryu [74], concluyó que las eficiencias de los antioxidantes están en el orden de TBHQ > PrG > BHA > BHT > alfatococerol. En el estudio se halló que con el uso de estos antioxidantes disminuye el BSFC. Sin embargo, los aditivos antioxidantes comerciales suelen ser caros y se producen a partir de materiales no renovables, por lo que existe una motivación en explorar nuevos aditivos alternativos de bajo costo, obtenidos a partir de biomasa o residuos [75].

9. Nanopartículas en el biodiésel

La adición de nanopartículas al combustible mejora las propiedades termofísicas del combustible, incluyendo

la conductividad, difusibilidad de masa y relación superficie-volumen, además de las propiedades fisicoquímicas como la viscosidad cinemática, punto de incendio, punto de inflamación, punto de fluidez y otras propiedades también son mejoradas [76].

En la Tabla 10 se presenta el comportamiento del motor con nanopartículas mezcladas con biodiésel. Los nanotubos de carbono aplicados (CNT) tienen el potencial de ser usados como aditivos en la combustión dual para ayudar a mejorar al combustible, y así poder obtener buenos resultados de BSFC, BTE y NO_x. Sin embargo, el inconveniente de la falta de estabilidad de la mezcla (con CNT) puede resolverse con la aplicación de un estabilizador de combustible o surfactante [77]. En la Tabla 11 se presenta el comportamiento de motor con la mezcla de biodiésel y CNT.

Una buena explicación de cómo usar nanopartículas la presentan Mirzajanzadeh *et al.* [78], sintetizaron un número nanocatalizador híbrido soluble con el fin de mejorar el rendimiento del motor, para lo cual agregaron un compuesto de óxido de cerio y nanotubos de carbono de pared múltiple con función amida y se lo añadió a la mezcla de diésel con biodiésel. Los resultados mostraron una reducción de CO, HC, NO_x y hollín; además, el rendimiento del motor mejoró y el consumo de combustible disminuyó. Sin embargo, las nanopartículas de óxido de cerio están asociadas con riesgos de salud, como la inducción de citotoxicidad, estrés oxidativo e inflamación pulmonar [79], por lo que su uso debe ser controlado. El reemplazo de nanopartículas a base de metal por nanopartículas no metálicas puede ser importante debido a que estas primeras son muy tóxicas [80].

Tabla 10. Análisis de las nanopartículas aplicadas en el biodiésel

Emisión que reduce	Tipo de nanopartículas	Rendimiento del motor	Ref.
CO y HC	TiO ₂	Mezcla con biodiésel (20 %) y el resto de diésel con el TiO ₂ se redujo el BSFC y mejoro el BTE, pero aumentó el CO ₂ y NO _x .	[81]
CO, CO ₂ y NO _x	Nanopartículas de titanio	La mezcla de biodiésel con nanopartículas de titanio reduce el BSFC y mejora la combustión y aumenta el BTE.	[82]
CO y HC	Óxidos de nanometálicos	La mezcla de biodiésel de aceite de mahua con nanopartículas en un motor CRDI reduce emisiones.	[83]
NO _x , HC y humo	Óxidos de cerio	La mezcla de 70 % de diésel, 10 % de biodiésel de aceite de ricino y un 20 % de etanol y una adición de 25 ppm de óxido de cerio redujo la velocidad de liberación de calor y con esto redujo emisiones.	[84]
CO y HC	Nanopartículas de alúmina	La mezcla de biodiésel con etanol y alúmina generó que aumentara la temperatura de los gases de escape y BTE, pero también incrementó el NO _x .	[85]
CO y NO _x	Mezclas de MgO y SiO ₂	Con la adición de las nanopartículas en el biodiésel, el desempeño del motor mejoró y redujo emisiones.	[86]
HC, CO y NO _x	Óxido de cobalto Co ₃ O ₄	La adición de CoO ₄ en el biodiésel de aceite de Jatropha mejoró la combustión y redujo emisiones en una operación de carga de motor del 75 %.	[87]
-	Óxido de cobre	La mezcla de óxido de cobre (50 ppm) con un 20 % de biodiésel de aceite de Mahua y el resto de diésel, esta mezcla redujo la combustión incompleta y mejoró el BTE y el arranque en frío.	[88]

Tabla 11. Comportamiento del motor y las emisiones con la mezcla de biodiésel con los nanotubos de carbono aplicados (CNT)

Emisión que reduce	Rendimiento del motor	Ref.
CO, HC y NO _x	Se aplicó una mezcla de CNT con una emulsión de éster metílico de Jatropha y generó un aumento de BTE comparándolo con el biodiésel puro.	[89]
NO _x	Con la mezcla del biodiésel y CNT logró aumentar el BTE.	[90]
CO, HC y hollín	Con la mezcla del biodiésel y CNT (5 % y 20 %) mejoró el BTE y se redujo el BSFC.	[76]
NO _x	La mezcla de biodiésel (aceite de neem metil éster) con CNT logró incrementar el BTE y por aumento del número de cetano se acortó el retardo de encendido porque mejoró la combustión.	[91]
Hollín	Con la mezcla de CNT, nanopartículas de óxido de cerio y diesterol se obtuvo una mezcla para combustión y mejor rendimiento en motor.	[92]

Por lo que una nueva alternativa se puede obtener con nanopartículas orgánicas como las cáscaras de coco que se pueden mezclar con biodiésel y aplicarlas en

el motor diésel [93]. En la Tabla 12 se presentan las características técnicas de la relación biodiésel.

Tabla 12. Características técnicas del biodiésel con nanopartículas

Propiedades	Biodiésel + nanopartículas				
	Aceite de alga + TiO ₂ -SiO ₂ 50	Aceite de mahua + ANP50	Aceite de soja + alúmina	Aceite de neem + CNT100	Aceite de Jatropha + 100 CNT
Densidad (kg/m ³)	817	827.5	-	889	899.4
Viscosidad cinemática a 40 °C (cSt)	3.03	3.37	3.37	4.28	5.76
Punto de inflamación °C	62.45	-	-	181	125
Número de cetano	48	49.5	52	53	55
Valor calorífico (kJ/kg)	42,600	41,665	42,590	40,920	37,350
Referencia	[81]	[83]	[85]	[91]	[89]

10. Conclusiones

Debido al alto costo del biodiésel en su producción y algunas propiedades adversas como puede ser su bajo valor calorífico, la alta viscosidad y densidad (comparado con el diésel convencional), obligan a realizar algunas estrategias para que el biodiésel se vuelva más atractivo en su aplicación. Hemos concluido que dos alternativas pueden favorecer en su aplicación en el futuro, la primera se refiere en encontrar una mezcla favorable que justifique la aplicación del biodiésel a escala comercial; la segunda opción es usar el biodiésel como combustible piloto, que requiere una relación entre el 10 % y 20 % del combustible total del motor, logrando con esto la aplicación y el impulso de otros tipos de biocombustibles como los combustibles gaseosos en el motor diésel dual.

Referencias

- [1] G. T. Kalghatgi, "The outlook for fuels for internal combustion engines," *International Journal of Engine Research*, vol. 15, no. 4, pp. 383–398, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/1468087414526189>
- [2] G. Kalghatgi, "Developments in internal combustion engines and implications for combustion science and future transport fuels," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 35, no. 1, pp. 101–115, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.10.002>
- [3] F. Barraaj and Y. Attalah, "Composite sustainable indicators framework for cost assessment of land transport mode in lebanon cities," *Journal of Transportation Technologies*, vol. 8, pp. 232–253, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/jtts.2018.83013>
- [4] H. Rashedul, H. Masjuki, M. Kalam, A. Ashraful, S. Ashrafur Rahman, and S. Shahir, "The effect of additives on properties, performance and emission of biodiesel fuelled compression ignition engine," *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 348–364, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.034>
- [5] O. M. Ali, R. Mamat, N. R. Abdullah, and A. A. Abdullah, "Analysis of blended fuel properties and engine performance with palm biodiesel–diesel blended fuel," *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 59–67, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.103>
- [6] G. Knothe, "Biodiesel and renewable diesel: A comparison," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, no. 3, pp. 364–373, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2009.11.004>
- [7] M. Canakci and M. Hosoz, "Energy and exergy analyses of a diesel engine fuelled with various biodiesels," *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 1, no. 4, pp. 379–394, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15567240500400796>

- [8] S. Chandra Sekhar, K. Karuppasamy, N. Vedaraman, A. Kabeel, R. Sathyamurthy, M. Elkelawy, and H. Alm ELDin Bastawissi, "Biodiesel production process optimization from pithecellobium dulce seed oil: Performance, combustion, and emission analysis on compression ignition engine fuelled with diesel/biodiesel blends," *Energy Conversion and Management*, vol. 161, pp. 141–154, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.074>
- [9] K. Purushothaman and G. Nagarajan, "Performance, emission and combustion characteristics of a compression ignition engine operating on neat orange oil," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 242–245, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.03.012>
- [10] M. Xie, Z. J. Ma, Q. H. Wang, and J. Liu, "Investigation of engine combustion and emission performance fuelled with neat ponde and ponde/diesel blend," *Journal of Xi'an Jiaotong University*, vol. 51, no. 3, pp. 32–37, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7652/xjtuxb201703006>
- [11] M. H. M. Yasin, R. Mamat, A. F. Yusop, P. Paruka, T. Yusaf, and G. Najafi, "Effects of exhaust gas recirculation (EGR) on a diesel engine fuelled with palm-biodiesel," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 30–36, 2015, clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future: The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015). [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.131>
- [12] K. Venkateswarlu, K. V. Kumar, B. S. R. Murthy, and V. V. Subbarao, "Effect of exhaust gas recirculation and ethyl hexyl nitrate additive on biodiesel fuelled diesel engine for the reduction of noxemissions," *Frontiers in Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 304–310, Sep 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11708-012-0195-9>
- [13] H. Raheman and S. Ghadge, "Performance of compression ignition engine with mahua (*madhuca indica*) biodiesel," *Fuel*, vol. 86, no. 16, pp. 2568–2573, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.02.019>
- [14] R. Vallinayagam, S. Vedharaj, W. Yang, P. Lee, K. Chua, and S. Chou, "Pine oil-biodiesel blends: A double biofuel strategy to completely eliminate the use of diesel in a diesel engine," *Applied Energy*, vol. 130, pp. 466–473, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.025>
- [15] P. Singh, S. Chauhan, and V. Goel, "Assessment of diesel engine combustion, performance and emission characteristics fuelled with dual fuel blends," *Renewable Energy*, vol. 125, pp. 501–510, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.105>
- [16] G. Kasiraman, B. Nagalingam, and M. Balakrishnan, "Performance, emission and combustion improvements in a direct injection diesel engine using cashew nut shell oil as fuel with camphor oil blending," *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 116–124, 2012, Asia-Pacific Forum on Renewable Energy 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.022>
- [17] P. Dubey and R. Gupta, "Effects of dual bio-fuel (jatropha biodiesel and turpentine oil) on a single cylinder naturally aspirated diesel engine without egr," *Applied Thermal Engineering*, vol. 115, pp. 1137–1147, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.125>
- [18] A. Sharma and S. Murugan, "Potential for using a tyre pyrolysis oil-biodiesel blend in a diesel engine at different compression ratios," *Energy Conversion and Management*, vol. 93, pp. 289–297, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.023>
- [19] Y. Liu, J. Li, and C. Jin, "Fuel spray and combustion characteristics of butanol blends in a constant volume combustion chamber," *Energy Conversion and Management*, vol. 105, pp. 1059–1069, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.047>
- [20] L. Zhu, C. Cheung, W. Zhang, and Z. Huang, "Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol-biodiesel blends," *Fuel*, vol. 90, no. 5, pp. 1743–1750, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.024>
- [21] G. Khoobakht, M. Karimi, and K. Kheiralipour, "Effects of biodiesel-ethanol-diesel blends on the performance indicators of a diesel engine: A study by response surface modeling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 148, pp. 1385–1394, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.025>
- [22] C. Zhan, Z. Feng, W. Ma, M. Zhang, C. Tang, and Z. Huang, "Experimental investigation on effect of ethanol and di-ethyl ether addition on the spray characteristics of diesel/biodiesel blends under high injection pressure," *Fuel*, vol. 218, pp. 1–11, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.038>
- [23] H. Imdadul, H. Masjuki, M. Kalam, N. Zulkifli, A. Alabdulkarem, M. Kamruzzaman, and M. Rashed, "A comparative study of C4 and C5 alcohol treated diesel-biodiesel blends in terms of

- diesel engine performance and exhaust emission,” *Fuel*, vol. 179, pp. 281–288, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.003>
- [24] H. Venu and V. Madhavan, “Effect of Al_2O_3 nanoparticles in biodiesel-diesel-ethanol blends at various injection strategies: Performance, combustion and emission characteristics,” *Fuel*, vol. 186, pp. 176–189, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.046>
- [25] H. Aydin and C. İlkılıç, “Effect of ethanol blending with biodiesel on engine performance and exhaust emissions in a CI engine,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 10, pp. 1199–1204, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.037>
- [26] B. J. Bora and U. K. Saha, “Comparative assessment of a biogas run dual fuel diesel engine with rice bran oil methyl ester, pongamia oil methyl ester and palm oil methyl ester as pilot fuels,” *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 490–498, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.019>
- [27] M. Zaharin, N. Abdullah, G. Najafi, H. Sharudin, and T. Yusaf, “Effects of physicochemical properties of biodiesel fuel blends with alcohol on diesel engine performance and exhaust emissions: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 475–493, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.035>
- [28] Y. Noorollahi, M. Azadbakht, and B. Ghobadian, “The effect of different diesterol (diesel–biodiesel–ethanol) blends on small air-cooled diesel engine performance and its exhaust gases,” *Energy*, vol. 142, pp. 196–200, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.024>
- [29] L. Wei, C. Cheung, and Z. Ning, “Effects of biodiesel-ethanol and biodiesel-butanol blends on the combustion, performance and emissions of a diesel engine,” *Energy*, vol. 155, pp. 957–970, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.049>
- [30] F. Aydın and H. Öğüt, “Effects of using ethanol-biodiesel-diesel fuel in single cylinder diesel engine to engine performance and emissions,” *Renewable Energy*, vol. 103, pp. 688–694, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.083>
- [31] M. Parthasarathy, J. Isaac Joshua Ramesh Lalvani, B. Dhinesh, and K. Annamalai, “Effect of hydrogen on ethanol–biodiesel blend on performance and emission characteristics of a direct injection diesel engine,” *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 134, pp. 433–439, 2016, Green Technologies for Environmental Pollution Control and Prevention (Part 2). [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.11.005>
- [32] T. Shudo, A. Fujibe, M. Kazahaya, Y. Aoyagi, I. Hajime, Y. Goto, and A. Noda, “The cold flow performance and the combustion characteristics with ethanol blended biodiesel fuel,” in *Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition*. SAE International, oct 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4271/2005-01-3707>
- [33] A. Paul, R. Panua, and D. Debroy, “An experimental study of combustion, performance, exergy and emission characteristics of a ci engine fueled by diesel-ethanol-biodiesel blends,” *Energy*, vol. 141, pp. 839–852, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.137>
- [34] D. B. Hulwan and S. V. Joshi, “Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel–ethanol–biodiesel blends of high ethanol content,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 5042–5055, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.008>
- [35] Z.-H. Zhang and R. Balasubramanian, “Investigation of particulate emission characteristics of a diesel engine fueled with higher alcohols/biodiesel blends,” *Applied Energy*, vol. 163, pp. 71–80, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.173>
- [36] V. Soloiu, M. Duggan, H. Ochieng, S. Harp, J. Weaver, C. Jenkins, and B. Vlcek, “Premixed charge of n-butanol coupled with direct injection of biodiesel for an advantageous Soot- NO_x trade-off,” in *SAE 2013 World Congress & Exhibition*. SAE International, apr 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4271/2013-01-0916>
- [37] J. Hou, Z. Wen, Z. Jiang, and X. Qiao, “Study on combustion and emissions of a turbocharged compression ignition engine fueled with dimethyl ether and biodiesel blends,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 87, no. 2, pp. 102–113, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.021>
- [38] K. Yang, L. Wei, C. Cheung, C. Tang, and Z. Huang, “The effect of pentanol addition on the particulate emission characteristics of a biodiesel operated diesel engine,” *Fuel*, vol. 209, pp. 132–140, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.093>

- [39] R. Sridhar, J. Jeevahan, and M. Chandrasekaran, "Effect of the addition of 1-pentanol on engine performance and emission characteristics of diesel and biodiesel fuelled single cylinder diesel engine," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 41, no. 1, pp. 58–63, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1443505>
- [40] V. Sriram, J. Jeevahan, G. Mageshwaran, G. B. Joseph, and R. B. Durairaj, "Engine performance and emission characteristics of 1-octanol blended bio-diesel in a single cylinder diesel engine," *International Journal of Mechanical and Production*, vol. 7, no. 6, pp. 623–630, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24247/ijmperddc201770>
- [41] N. Yilmaz, A. Atmanli, and F. M. Vigil, "Quaternary blends of diesel, biodiesel, higher alcohols and vegetable oil in a compression ignition engine," *Fuel*, vol. 212, pp. 462–469, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.050>
- [42] D. Babu and R. Anand, "Effect of biodiesel-diesel-n-pentanol and biodiesel-diesel-n-hexanol blends on diesel engine emission and combustion characteristics," *Energy*, vol. 133, pp. 761–776, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.103>
- [43] D. Barik and S. Murugan, "Effects of diethyl ether (DEE) injection on combustion performance and emission characteristics of karanja methyl ester (kme)–biogas fueled dual fuel diesel engine," *Fuel*, vol. 164, pp. 286–296, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.094>
- [44] M. Vinod Babu, K. Madhu Murthy, and R. G. Amba Prasad, "Butanol and pentanol: The promising biofuels for CI engines – a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 1068–1088, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.038>
- [45] B. Sahoo, "Clean development mechanism potential of compression ignition diesel engines using gaseous fuels in dual fuel mode," Ph.D. dissertation, Indian Institute of Technology Guwahati, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3oGiWJA>
- [46] C. Luijten and E. Kerkhof, "Jatropha oil and biogas in a dual fuel CI engine for rural electrification," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 2, pp. 1426–1438, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.005>
- [47] A. Hasannuddin, J. Wira, S. Sarah, M. Ahmad, S. Aizam, M. Aiman, S. Watanabe, N. Hirofumi, and M. Azrin, "Durability studies of single cylinder diesel engine running on emulsion fuel," *Energy*, vol. 94, pp. 557–568, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.144>
- [48] K. Ramalingam, A. Kandasamy, L. Subramani, D. Balasubramanian, and J. Paul James Thadhani, "An assessment of combustion, performance characteristics and emission control strategy by adding anti-oxidant additive in emulsified fuel," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 9, no. 5, pp. 959–967, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.02.007>
- [49] A. Hasannuddin, J. Wira, S. Sarah, W. Wan Syaidatul Aqma, A. Abdul Hadi, N. Hirofumi, S. Aizam, M. Aiman, S. Watanabe, M. Ahmad, and M. Azrin, "Performance, emissions and lubricant oil analysis of diesel engine running on emulsion fuel," *Energy Conversion and Management*, vol. 117, pp. 548–557, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.057>
- [50] M. Abedin, A. Imran, H. Masjuki, M. Kalam, S. Shahir, M. Varman, and A. Ruhul, "An overview on comparative engine performance and emission characteristics of different techniques involved in diesel engine as dual-fuel engine operation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 306–316, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.118>
- [51] S. H. Yoon and C. S. Lee, "Experimental investigation on the combustion and exhaust emission characteristics of bio-gas–biodiesel dual-fuel combustion in a CI engine," *Fuel Processing Technology*, vol. 92, no. 5, pp. 992–1000, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.12.021>
- [52] X. Yuan, X. Ding, L. Leng, H. Li, J. Shao, Y. Qian, H. Huang, X. Chen, and G. Zeng, "Applications of bio-oil-based emulsions in a DI diesel engine: The effects of bio-oil compositions on engine performance and emissions," *Energy*, vol. 154, pp. 110–118, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.118>
- [53] G. Kannan and R. Anand, "Experimental investigation on diesel engine with diesel–water micro emulsions," *Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1680–1687, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.062>
- [54] A. B. Koc and M. Abdullah, "Performance and NOx emissions of a diesel engine fueled with biodiesel-diesel-water nanoemulsions," *Fuel Processing Technology*, vol. 109, pp. 70–77, may 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.039>

- [55] A. Sarvi, C.-J. Fogelholm, and R. Zevenhoven, "Emissions from large-scale medium-speed diesel engines: 1. influence of engine operation mode and turbocharger," *Fuel Processing Technology*, vol. 89, no. 5, pp. 510–519, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.10.006>
- [56] R. Prakash, R. Singh, and S. Murugan, "Experimental investigation on a diesel engine fueled with bio-oil derived from waste wood–biodiesel emulsions," *Energy*, vol. 55, pp. 610–618, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.085>
- [57] —, "Experimental studies on combustion, performance and emission characteristics of diesel engine using different biodiesel bio oil emulsions," *Journal of the Energy Institute*, vol. 88, no. 1, pp. 64–75, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.04.005>
- [58] A. Paul, R. S. Panua, D. Debroy, and P. K. Bose, "Effect of compressed natural gas dual fuel operation with diesel and pongamia pinata methyl ester (PPME) as pilot fuels on performance and emission characteristics of a CI (compression ignition) engine," *Energy*, vol. 68, pp. 495–509, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.026>
- [59] L. Tarabet, M. Lounici, K. Loubar, K. Khiari, R. Bouguessa, and M. Tazerout, "Hydrogen supplemented natural gas effect on a DI diesel engine operating under dual fuel mode with a biodiesel pilot fuel," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 11, pp. 5961–5971, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.045>
- [60] K. Ryu, "Effects of pilot injection pressure on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel–CNG dual fuel," *Energy Conversion and Management*, vol. 76, pp. 506–516, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.085>
- [61] R. Senthilraja, V. Sivakumar, K. Thirugnanasambandham, and N. Nedunchezian, "Performance, emission and combustion characteristics of a dual fuel engine with diesel–ethanol – cotton seed oil methyl ester blends and compressed natural gas (CNG) as fuel," *Energy*, vol. 112, pp. 899–907, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.114>
- [62] S. S. Kalsi and K. Subramanian, "Experimental investigations of effects of hydrogen blended CNG on performance, combustion and emissions characteristics of a biodiesel fueled reactivity controlled compression ignition engine (RCCI)," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 7, pp. 4548–4560, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.147>
- [63] V. Chintala and K. Subramanian, "A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 472–491, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.24788>
- [64] E. Uludamar, Şafak Yıldızhan, K. Aydın, and M. Özcanlı, "Vibration, noise and exhaust emissions analyses of an unmodified compression ignition engine fuelled with low sulphur diesel and biodiesel blends with hydrogen addition," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 26, pp. 11 481–11 490, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.179>
- [65] T. Korakianitis, A. Namasivayam, and R. Crookes, "Hydrogen dual-fuelling of compression ignition engines with emulsified biodiesel as pilot fuel," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 24, pp. 13 329–13 344, 2010, 3rd Asian Bio Hydrogen Symposium. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.007>
- [66] M. Senthil Kumar, A. Ramesh, and B. Nagalingam, "Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 10, pp. 1143–1154, 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00234-3](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00234-3)
- [67] M. O. Hamdan and M. Y. Selim, "Performance of CI engine operating with hydrogen supplement co-combustion with joboba methyl ester," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 24, pp. 10 255–10 264, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.168>
- [68] H. Masjuki, A. Ruhul, N. N. Mustafi, M. Kalam, M. Arbab, and I. Rizwanul Fattah, "Study of production optimization and effect of hydroxyl gas on a CI engine performance and emission fueled with biodiesel blends," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 33, pp. 14 519–14 528, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.273>
- [69] M. G. Shirk, T. P. McGuire, G. L. Neal, and D. C. Haworth, "Investigation of a hydrogen-assisted combustion system for a light-duty diesel vehicle," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 23, pp. 7237–7244, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.128>

- [70] M. Senthil Kumar and M. Jaikummar, "Studies on the effect of hydrogen induction on performance, emission and combustion behaviour of a WCO emulsion based dual fuel engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 32, pp. 18 440–18 450, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.124>
- [71] K. A. Subramanian and V. Chintala, "Reduction of GHGs emissions in a biodiesel fueled diesel engine using hydrogen," Oct 2013, volume 2: Fuels; Numerical Simulation; Engine Design, Lubrication, and Applications. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/ICEF2013-19133>
- [72] K. Varatharajan and M. Cheralathan, "Effect of aromatic amine antioxidants on NO_x emissions from a soybean biodiesel powered DI diesel engine," *Fuel Processing Technology*, vol. 106, pp. 526–532, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.023>
- [73] H. Rashedul, H. Masjuki, M. Kalam, Y. Teoh, H. How, and I. Rizwanul Fattah, "Effect of antioxidant on the oxidation stability and combustion–performance–emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel–biodiesel blend," *Energy Conversion and Management*, vol. 106, pp. 849–858, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.024>
- [74] K. Ryu, "The characteristics of performance and exhaust emissions of a diesel engine using a biodiesel with antioxidants," *Biore-source Technology*, vol. 101, no. 1, Supplement, pp. S78–S82, 2010, Supplement Issue on Recent Developments of Biomass Conversion Technologies. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.034>
- [75] C. Dueso, M. Muñoz, F. Moreno, J. Arroyo, N. Gil-Lalaguna, A. Bautista, A. Gonzalo, and J. L. Sánchez, "Performance and emissions of a diesel engine using sunflower biodiesel with a renewable antioxidant additive from bio-oil," *Fuel*, vol. 234, pp. 276–285, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.013>
- [76] S. H. Hosseini, A. Taghizadeh-Alisaraei, B. Ghobadian, and A. Abbaszadeh-Mayvan, "Performance and emission characteristics of a ci engine fuelled with carbon nanotubes and diesel-biodiesel blends," *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 201–213, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.013>
- [77] A. F. Chen, M. Akmal Adzmi, A. Adam, M. F. Othman, M. K. Kamaruzzaman, and A. G. Mrwan, "Combustion characteristics, engine performances and emissions of a diesel engine using nanoparticle-diesel fuel blends with aluminium oxide, carbon nanotubes and silicon oxide," *Energy Conversion and Management*, vol. 171, pp. 461–477, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.004>
- [78] M. Mirzajanzadeh, M. Tabatabaei, M. Ardjmand, A. Rashidi, B. Ghobadian, M. Barkhi, and M. Pazouki, "A novel soluble nano-catalysts in diesel–biodiesel fuel blends to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions," *Fuel*, vol. 139, pp. 374–382, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.008>
- [79] A. Srinivas, P. J. Rao, G. Selvam, P. B. Murthy, and P. N. Reddy, "Acute inhalation toxicity of cerium oxide nanoparticles in rats," *Toxicology Letters*, vol. 205, no. 2, pp. 105–115, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2011.05.1027>
- [80] S. Hoseini, G. Najafi, B. Ghobadian, R. Mamat, M. Ebadi, and T. Yusaf, "Novel environmentally friendly fuel: The effects of nanographene oxide additives on the performance and emission characteristics of diesel engines fuelled with ailanthus altissima biodiesel," *Renewable Energy*, vol. 125, pp. 283–294, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.104>
- [81] S. Karthikeyan and A. Prathima, "Environmental effect of ci engine using microalgae methyl ester with doped nano additives," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 50, pp. 385–396, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.028>
- [82] R. D'Silva, K. Binu, and T. Bhat, "Performance and emission characteristics of a C.I. engine fuelled with diesel and TiO₂ nanoparticles as fuel additive," *Materials Today: Proceedings*, vol. 2, no. 4, pp. 3728–3735, 2015, 4th International Conference on Materials Processing and Characterization. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.162>
- [83] C. S. Aalam and C. Saravanan, "Effects of nano metal oxide blended mahua biodiesel on CRDI diesel engine," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 689–696, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.09.013>
- [84] V. Arul, A. Selvan V, A. r b, and M. Udayakumar, "Effects of cerium oxide nanoparticle addition in diesel and diesel-biodiesel-ethanol blends on the performance and emission characteristics of a CI engine," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 4, 09 2009. [Online]. Available: <https://bit.ly/3qgUUoW>

- [85] T. Shaafi and R. Velraj, "Influence of alumina nanoparticles, ethanol and isopropanol blend as additive with diesel-soybean biodiesel blend fuel: Combustion, engine performance and emissions," *Renewable Energy*, vol. 80, pp. 655–663, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.042>
- [86] T. Özgür, M. Özcanli, and K. Aydin, "Investigation of nanoparticle additives to biodiesel for improvement of the performance and exhaust emissions in a compression ignition engine," *International Journal of Green Energy*, vol. 12, no. 1, pp. 51–56, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.889011>
- [87] D. Ganesh and G. Gowrishankar, "Effect of nano-fuel additive on emission reduction in a biodiesel fuelled CI engine," in *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2011, pp. 3453–3459. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICECENG.2011.6058240>
- [88] S. Senthur Prabu, M. Asokan, R. Roy, S. Francis, and M. Sreelekh, "Performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel/diesel blends with additives," *Energy*, vol. 122, pp. 638–648, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.119>
- [89] J. Sadhik Basha and R. Anand, "Performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine using carbon nanotubes blended jatropha methyl ester emulsions," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 53, no. 2, pp. 259–273, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.04.001>
- [90] P. Tewari, E. Doijode, N. Banapurmath, and V. Yaliwal, "Experimental investigations on a diesel engine fuelled with multi-walled carbon nanotubes blended biodiesel fuels," *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, vol. 4, pp. 129–138, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18245/ijaet.59113>
- [91] B. Gnanasikamani, "Effect of cnt as additive with biodiesel on the performance and emission characteristics of a DI diesel engine," *International Journal of ChemTech Research*, vol. 7, pp. 1230–1236, 02 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/43dFnF9>
- [92] V. Arul Mozhi Selvan, R. Anand, and M. Udayakumar, "Effect of cerium oxide nanoparticles and carbon nanotubes as fuel-borne additives in diesterol blends on the performance, combustion and emission characteristics of a variable compression ratio engine," *Fuel*, vol. 130, pp. 160–167, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.034>
- [93] K. Vinukumar, A. Azhagurajan, S. Vettivel, N. Vedaraman, and A. Haiter Lenin, "Biodiesel with nano additives from coconut shell for decreasing emissions in diesel engines," *Fuel*, vol. 222, pp. 180–184, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.129>