

Análisis de los parámetros de ajuste del motor para operación con biodiésel

Analysis of engine adjustment parameters for biodiesel operation

Héctor Hugo Riojas González^{1*}, Eusebio Jiménez López², José Haces Lozano¹

¹ Universidad Politécnica de Victoria, CP. 87138, Cd. Victoria, Tamaulipas, México. hriojasg@upv.edu.mx

² Instituto Tecnológico Superior de Cajeme, CP. 85024 Cd. Obregón, Sonora, México.

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Ajustes; motor;
biocombustible;
biodiésel.

El uso de biocombustibles como el biodiésel en motores de combustión puede aumentar el consumo específico de combustible y emisiones, como los óxidos de nitrógeno (NOx). Este estudio presenta una revisión sistemática analítica para explorar alternativas de ajuste en motores destinadas a mitigar estas limitaciones. La revisión se centró en literatura sobre el efecto de la relación de compresión, recirculación de gases de escape (EGR) y el tiempo de inyección. Los hallazgos señalan que el retardo del tiempo de inyección y la aplicación de EGR son las técnicas más efectivas para reducir los NOx, aunque pueden aumentar el monóxido de carbono (CO). Asimismo, aumentar la relación de compresión mejora la eficiencia térmica del freno (BTE). Se concluye que combinar dos o más técnicas, como EGR con ajustes en el tiempo de inyección o un límite magro, es indispensable para lograr simultáneamente un rendimiento óptimo y reducir las emisiones de NOx.

Abstract

Keywords:

Adjustments; engine;
biofuel; biodiesel.

The utilization of biofuels such as biodiesel in internal combustion engines often results in increased specific fuel consumption and higher emissions of certain pollutants, particularly nitrogen oxides (NOx). This study conducts a systematic and analytical review to explore and organize various engine adjustment strategies aimed at mitigating these drawbacks. The review focuses on recent literature addressing the influence of compression ratio, exhaust gas recirculation (EGR), and injection timing. The analysis reveals that retarding injection timing and implementing EGR are the most effective techniques for reducing NOx emissions, albeit potentially leading to an increase in carbon monoxide (CO) emissions. In contrast, increasing the compression ratio contributes to improved thermal efficiency. The study concludes that combining two or more techniques such as EGR with injection timing adjustments or operating under lean-burn conditions is essential to simultaneously achieve optimal engine performance and effective NOx emission reduction.

Recibido: 14 de mayo de 2025

Aceptado: 23 de marzo de 2026

Publicado: 09 de septiembre de 2026

Cómo citar: Riojas, H. H.; Jiménez, E.; & Haces, J. (2026). Análisis de los parámetros de ajuste del motor para operación con biodiésel. *Acta Universitaria*, 36, e4637. doi. <https://doi.org/10.15174/au.2026.4637>

Introducción

El sector del transporte representa alrededor del 25% del consumo global de energía primaria, y los combustibles fósiles cubren más del 95% de este consumo (Lindstad *et al.*, 2023). El incremento en el costo de los combustibles fósiles y el calentamiento global han generado la necesidad de emplear combustibles alternativos, cuya utilización será cada vez más relevante en el futuro (Azni *et al.*, 2023). Sin embargo, los motores actuales no están diseñados originalmente para operar con este tipo de combustibles, por lo que se requieren modificaciones y ajustes en su configuración. Entre estos se incluyen cambios en la temperatura de la carga inicial, la presión, la calidad del combustible, la relación aire-combustible y el aumento de la presión de inyección, factores que mejoran el desempeño del motor (Feng *et al.*, 2022). Dentro de los combustibles alternativos, los biocombustibles líquidos han recibido una atención significativa debido a su potencial para sustituir parcial o totalmente a los combustibles fósiles en motores de combustión interna. Algunos biocombustibles, como el biodiésel, presentan un menor poder calorífico, así como mayor densidad y viscosidad, lo que provoca un incremento en el consumo específico de combustible (BSFC). Esto se debe a que se requiere una mayor cantidad de combustible para alcanzar el mismo nivel de desempeño (Xiong *et al.*, 2024), por lo que resulta necesario modificar o ajustar ciertos parámetros del motor. Asimismo, el uso de biocombustibles como el biodiésel puede contribuir a la reducción de emisiones contaminantes, tales como monóxido de carbono (CO), material particulado (PM) e hidrocarburos (HC). No obstante, otras emisiones, como los óxidos de nitrógeno (NOx), tienden a incrementarse (Ushakov *et al.*, 2013). Por esta razón, se requieren ajustes en el motor para mitigar la formación de NOx, tales como una combustión premezclada menos intensa, la reducción de la temperatura del combustible, una combustión más lenta y una disminución en la concentración de oxígeno (Mashruk *et al.*, 2024). Entre las tecnologías disponibles para la reducción de NOx se encuentran la Recirculación de Gases de Escape (EGR), la inyección de agua, la Combustión de Carga de Compresión Homogénea (HCCI) y el ajuste del tiempo de inyección (Chintala & Subramanian, 2017). En este contexto, la finalidad de esta investigación es analizar las diferentes alternativas de ajuste aplicables en motores de encendido por compresión (CI), evaluando el impacto de los principales parámetros de operación cuando se utilizan biocombustibles líquidos. Bajo este enfoque, el análisis se centra exclusivamente en combustibles líquidos, excluyendo los combustibles gaseosos y los combustibles sólidos en forma de polvo.

Metodología

Este estudio se desarrolló bajo la modalidad de una Revisión Sistemática de Literatura (RSL) de tipo analítico-crítico, cuyo objetivo fue sistematizar y evaluar el impacto de las principales estrategias de ajuste mecánico y operativo de motores de encendido por compresión (CI) para el uso de biodiésel.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La identificación de la literatura se realizó mediante una búsqueda estructurada en las bases de datos académicas Scopus y ScienceDirect, cubriendo el período comprendido entre 2015 y 2025 con el fin de garantizar la actualidad de los estudios analizados. Para la identificación de los trabajos relevantes se emplearon ecuaciones de búsqueda basadas en combinaciones de palabras clave relacionadas con biodiésel, motores de encendido por compresión y parámetros de ajuste del motor. La ecuación general de búsqueda utilizada fue la siguiente: ("biodiesel" o "biodiesel fuel") y ("diesel engine" o "compression ignition engine") y ("engine parameters" o "injection timing" o "injection pressure" o "EGR" o "combustion parameters"). La búsqueda inicial permitió identificar 711 artículos potencialmente relevantes en ambas bases de datos.

Criterios de selección

Los artículos identificados fueron sometidos a un proceso de filtrado basado en criterios de inclusión y exclusión definidos previamente (Tabla 1).

Tabla 1. Criterios de selección.

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
Artículos de investigación o revisión con evaluación por pares.	Literatura gris (tesis, informes técnicos no revisados) o patentes.
Idioma español o inglés.	Estudios centrados exclusivamente en combustibles gaseosos (H ₂ , GNC).
Estudios con resultados experimentales o análisis numéricos sobre el impacto de parámetros de ajuste del motor.	Estudios centrados únicamente en la producción del biocombustible, sin análisis del comportamiento en el motor.

Fuente: Elaboración propia.

Tras la aplicación de estos criterios y la revisión de títulos, resúmenes y textos completos, 320 artículos fueron finalmente seleccionados para el análisis en profundidad.

Proceso de extracción y síntesis de datos

Posteriormente, los datos clave de los artículos seleccionados fueron extraídos y clasificados para su análisis comparativo. Aunque se emplearon herramientas bibliométricas preliminares (Ucinet y Bibexcel) para identificar tendencias generales en la literatura, el enfoque principal del estudio se centró en el análisis crítico de los resultados reportados.

Este proceso permitió identificar:

1. Las fortalezas y limitaciones de cada técnica de ajuste analizada de forma individual.
2. Las estrategias de combinación de técnicas con mayor potencial para optimizar simultáneamente el rendimiento del motor y la reducción de emisiones.

El proceso completo de identificación, selección y filtrado de los estudios se resume mediante un diagrama de flujo tipo PRISMA, en la Figura 1, se muestra las diferentes etapas de selección de la literatura analizada.

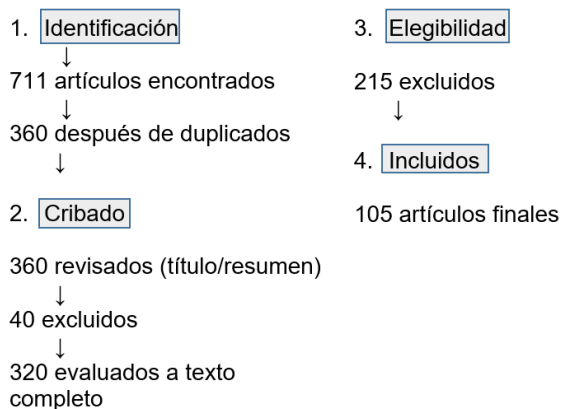


Figura 1. Diagrama de tipo PRIMA de las etapas de selección.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de los parámetros para ajustar

Problemas por no ajustar o modificar el motor

El uso directo de aceites vegetales como combustibles alternativos puede generar una atomización deficiente debido a su alta viscosidad, lo que provoca combustión incompleta y formación de depósitos de carbono en componentes del motor como aros de pistón, paredes del cilindro e inyectores (Prabu *et al.*, 2018). Además, estos aceites pueden obstruir filtros y boquillas, así como ocasionar fallas en la lubricación debido a fenómenos de polimerización (Kumar & Dinesha, 2018). Woldetensy *et al.* (2025) evaluaron mezclas directas de aceites vegetales con diésel y observaron que su mayor viscosidad favorece la atomización deficiente y la combustión incompleta, lo que conduce a la acumulación de carbono en inyectores y asientos de válvulas.

Entre los biocombustibles líquidos también se encuentra la pirolisis líquida cruda; sin embargo, su uso presenta dificultades como problemas de combustión, arranque deficiente, operación inestable, mayor consumo de combustible, incremento de emisiones de CO y fenómenos de corrosión y erosión en los sistemas de suministro (Hossain & Davies, 2013). Problemas similares pueden presentarse con el biodiésel, el cual puede incrementar las emisiones de NOx y generar inconvenientes en la durabilidad del motor, como el taponamiento de filtros e inyectores en condiciones de baja temperatura (Wang *et al.*, 2017). Estas limitaciones se relacionan principalmente con su mayor viscosidad y densidad.

Asimismo, Thangamani *et al.* (2021) reportaron obstrucciones en filtros asociadas a compuestos presentes en el biodiésel, como monoglicéridos saturados (SMG), esteroides glucósidos (SG) y sales de carboxilato. Adicionalmente, su menor contenido energético respecto al diésel convencional puede provocar una ligera disminución de potencia y un incremento en el consumo de combustible de entre 2 y 10 % (Atabani *et al.*, 2012).

Límites magros

El uso de mezclas magras puede mejorar la eficiencia térmica del motor y reducir las emisiones de NOx y humo. En este contexto, la combustión HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) se ha estudiado como una estrategia para optimizar el rendimiento y disminuir las emisiones en comparación con los motores de encendido por compresión tradicionales (Teoh *et al.*, 2021). La combustión magra se caracteriza por la presencia de un exceso de aire en la mezcla aire-combustible. El límite magro (Figura 2) corresponde a la máxima relación aire-combustible que permite una combustión estable sin fallos de encendido (Mehra *et al.*, 2017). Tanto los límites ricos como los magros representan los extremos de operación del motor, por lo que es necesario mantener una mezcla adecuada para maximizar su desempeño (Nadaleti & Przybyla, 2018). Aunque operar con mezclas más magras puede reducir las emisiones de NOx, también implica trabajar cerca del límite de fallo de encendido, lo que puede afectar la estabilidad de la combustión y aumentar las emisiones de HC y CO debido a variaciones cíclicas (Lee *et al.*, 2014).

En el caso del hidrógeno, las mezclas magras pueden disminuir las pérdidas por bombeo y reducir las emisiones de NOx, mejorando la eficiencia del motor (Pielecha *et al.*, 2024). No obstante, la velocidad de combustión bajo estas condiciones es menor, ya que el exceso de aire retrasa la propagación de la llama, prolongando la duración de la combustión y reduciendo la eficiencia global (Bhasker & Porpatham, 2016; Bhasker & Porpatham, 2017).

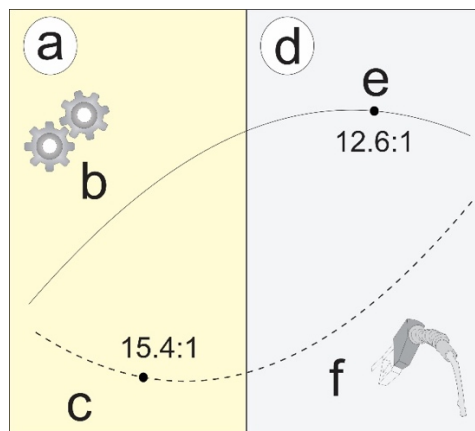


Figura 2. Gráfico de mezcla donde: a) magro, b) poder, c) economía máxima, d) mezcla rica, e) máxima potencia, f) consumo.
Fuente: Elaboración propia.

Cargas en el motor

El biodiésel presenta un menor poder calorífico y mayores valores de densidad y viscosidad que el diésel convencional, lo que requiere ajustes en el motor. Entre los parámetros operativos, la carga del motor tiene un impacto directo en su rendimiento (Uyumaz, 2018). La combustión dual representa una alternativa para mejorar la eficiencia del motor, ya que permite un funcionamiento más suave y flexible con distintos biocombustibles, además de posibles ahorros de combustible y mayor seguridad operativa (Stylianidis *et al.*, 2017).

A medida que aumenta la carga del motor, también se incrementa la cantidad de combustible inyectado, lo que genera una mayor liberación de energía, eleva la temperatura de combustión y favorece la formación de hollín (Park *et al.*, 2016). En motores duales, la eficiencia térmica del freno (BTE) suele ser menor en cargas bajas e intermedias, mientras que en cargas altas puede igualar o incluso superar el desempeño del diésel convencional (Lounici *et al.*, 2014). Sin embargo, por debajo de una carga mínima el motor puede presentar dificultades de operación debido a que la mezcla se vuelve demasiado magra para una combustión completa (Yaliwal *et al.*, 2014).

Yang y Wang (2023) evaluaron un motor YANMAR TF120M operando a 2400 rpm y observaron que, en cargas bajas, la vaporización del etanol reduce la temperatura de combustión y, por lo tanto, las emisiones de NOx. En cargas altas, el mayor contenido de oxígeno del etanol aumenta la temperatura de combustión y las emisiones de NOx. Asimismo, la recirculación de gases de escape (EGR) disminuye la concentración de oxígeno y reduce la temperatura de combustión, lo que contribuye a disminuir estas emisiones (Doornbos *et al.*, 2015).

Por ello, se han propuesto diversas estrategias para mejorar la operación dual en cargas parciales, como el precalentamiento de la mezcla aire-combustible (Mohanasundaram & Govindan, 2020), el uso de EGR y el control de la temperatura de admisión (Elkelawy *et al.*, 2022). Otras medidas incluyen incrementar la presión y velocidad del aire de admisión, así como optimizar la cantidad y el momento de la inyección piloto (Han *et al.*, 2020).

Efectos de la relación de compresión

La eficiencia del motor puede mejorar significativamente con el aumento de la relación de compresión (Figura 3), ya que favorece la propagación de la llama y reduce los gases de escape (Kamboj & Karimi, 2013). En estas condiciones, la eficiencia térmica del freno (BTE) aumenta debido a una combustión más completa y a mayores tasas de liberación de calor, así como a presiones y temperaturas más elevadas dentro del cilindro (Hariram & Shangar, 2015).

Sin embargo, relaciones de compresión elevadas también generan limitaciones, como mayores tensiones mecánicas en el motor, incremento de las pérdidas por transferencia de calor y aumento en las emisiones de NOx (Yan *et al.*, 2018). Como se muestra en la Tabla 2, la mayoría de los estudios coinciden en que el incremento de la relación de compresión mejora la eficiencia térmica del freno cuando se emplea biodiésel. Sin embargo, este incremento también tiende a aumentar las emisiones de NOx debido a las mayores temperaturas de combustión. Afzal *et al.* (2021) evaluaron el rendimiento de un motor diésel utilizando biodiésel derivado de diversas fuentes, incluyendo *Pongamia pinnata*, *Calophyllum inophyllum*, aceite de cocina usado y aceite ácido, bajo una relación de compresión de 17.5:1. Los resultados mostraron que la mezcla con aceite ácido presentó la mayor eficiencia térmica, particularmente a cargas elevadas.

Tabla 2. Relación de compresión (RC) del motor con biocombustibles.

Tipo de biocombustible	RC óptima	Condiciones de operación	Referencia
Biodiésel de aceite Mahua con diésel	16, 17 y 18	El BTE aumentó un 8.87% para la mezcla B90, en comparación con el diésel puro	Parekh <i>et al.</i> (2024)
Biodiésel de aceite de cocina usado con diésel	18:1	Con una mezcla y RC fija se obtuvieron resultados viables, especialmente a velocidades altas (2400 rpm)	Biswakarma <i>et al.</i> (2023)
Mezclas de hidrógeno y gas natural comprimido	12.5:1	Con esta mezcla y RC se obtuvo el mayor par de freno y el menor BSFC	Tangoz <i>et al.</i> (2015)
Biogás y diésel como combustible piloto	18:1	Con el ajuste de la RC, y un tiempo de inyección de 29° BTDC, se incrementó el BTE y se redujeron las emisiones de CO y HC	Bora & Sah (2016)
Mezcla de diésel y etanol	16:1	Se evaluaron tres RC y se determinó que 16:1 fue la óptima	Britto & Martins (2014)
Mezcla de biodiésel de aceite de cocina usado con diésel	18:1	Con una mezcla del 40% de biodiésel se obtuvo la máxima BTE a plena carga	Selva <i>et al.</i> (2015)
Mezcla de un 80% de biodiésel y un 20% de aceite de pirólisis de neumático de desecho	18.5:1	Con esa mezcla se obtuvo la máxima BTE con presión óptima de apertura de la boquilla	Sharma & Murugan (2015)
Biodiésel de palma	16:1, 17:1 y 18:1	La RC de 18:1 produjo la mayor eficiencia térmica de frenado y menores emisiones	Rosha <i>et al.</i> (2019)

Fuente: Elaboración propia.

La implementación de sistemas turboalimentados puede incrementar hasta un 33 % la potencia y un 46 % el par torsional en comparación con motores diésel de aspiración natural (Abedin *et al.*, 2013). No obstante, McCarthy *et al.* (2011) observaron pérdidas de potencia y par de aproximadamente 4 % y 5 %, respectivamente, al utilizar biodiésel en motores tanto aspirados naturalmente como turboalimentados.

La velocidad de propagación de la llama y la fracción de mezcla no quemada pueden inducir fenómenos de detonación en motores de combustión dual (Nguyen & Le, 2022). Algunos biocombustibles también pueden provocar fugas en el sistema de suministro debido a su baja viscosidad o aumentar la probabilidad de detonación (Siddique *et al.*, 2021; Olson *et al.*, 2025). Este fenómeno corresponde a una combustión anormal que limita el desempeño del motor y puede detectarse mediante mediciones de presión en el cilindro, vibraciones del bloque o análisis acústico (Abdelaal *et al.*, 2013).

Para reducir la probabilidad de detonación se pueden aplicar diversas estrategias, como incrementar la velocidad del motor para intensificar la turbulencia de la mezcla y reducir la duración de la combustión (Gómez *et al.*, 2018). Asimismo, mantener una relación de compresión adecuada y una mezcla homogénea contribuye a prevenir este fenómeno.

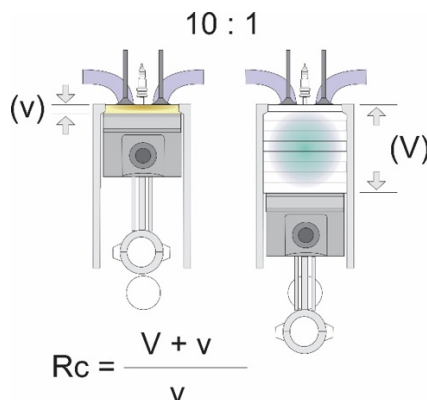


Figura 3. Relación de compresión, donde v corresponde a la cámara de combustión y V al cilindro.

Fuente: Elaboración propia.

Ajuste del tiempo de inyección y encendido

El ajuste del tiempo de inyección y la posición del avance del encendido (Figura 4) es fundamental para optimizar el rendimiento del motor, especialmente cuando se utilizan biocombustibles como el biodiésel, cuyas propiedades fisicoquímicas influyen directamente en el proceso de combustión (Gad & Ghazaly, 2023; Othman *et al.*, 2017).

El retraso de ignición se define como el intervalo entre la inyección del combustible y el inicio de la combustión, generalmente expresado en grados de ángulo de cigüeñal. Este parámetro depende del tipo de combustible y de la presión de sobrealimentación (Söyler, 2025). Un retraso excesivo puede provocar combustión incompleta, reduciendo la eficiencia térmica del freno y aumentando el consumo específico de combustible. Sin embargo, retardar el tiempo de inyección puede contribuir a disminuir significativamente las emisiones de NOx (Ashok *et al.*, 2017). Diversos estudios han analizado estrategias para reducir estas emisiones. Palash *et al.* (2013) evaluaron técnicas como la recirculación de gases de escape (EGR), el retardo del tiempo de inyección, la emulsificación de combustible y la inyección de agua. Los resultados mostraron que el retardo de la inyección puede reducir hasta un 38 % las emisiones de NOx, mientras que la aplicación de EGR puede alcanzar reducciones cercanas al 84 %. No obstante, Rahman *et al.* (2014) señalaron que la reducción de NOx mediante retardo en la inyección suele ir acompañada de incrementos en las emisiones de HC y CO.

Banapurmath *et al.* (2012) analizaron el rendimiento de un sistema de combustión dual utilizando biodiésel de HOME y GNC, encontrando que el avance en el tiempo de inyección y el aumento de la relación de compresión incrementan la BTE y reducen las emisiones de humo, HC y CO, aunque con un aumento significativo de NOx. Resultados similares fueron reportados por Hedfi *et al.* (2014) y Dhar y Agarwal (2015), quienes observaron reducciones de NOx mediante ajustes en la temporización de encendido e inyección. Algunos autores proponen el precalentamiento del aire de admisión o del biocombustible como estrategia para mejorar la atomización y controlar el inicio de la ignición. Teoh *et al.* (2021) indicaron que el calentamiento del aire de admisión influye en la reacción de baja temperatura y permite un mejor control del inicio de la combustión. Sin embargo, la incorporación de calentadores eléctricos incrementa el costo del sistema y puede afectar negativamente el rendimiento del motor (Olabi *et al.*, 2022).

Por ejemplo, Srinivasan *et al.* (2022) reportaron que el precalentamiento de biodiésel de aceite de girasol a 70 °C mejora la eficiencia térmica y reduce las emisiones de CO y HC, aunque incrementa las emisiones de NOx. De manera similar, Pipitone & Costanza (2018) demostraron que el precalentamiento del aceite de palma crudo modifica su viscosidad y la formación de depósitos de carbono en el motor.

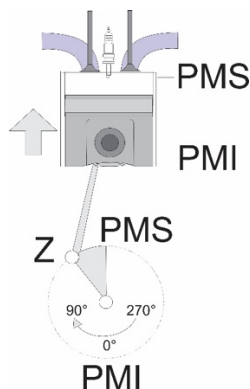


Figura 4. Posición de avance de encendido: PMS = punto muerto superior, PMI = punto muerto inferior y Z = punto de encendido.
Fuente: Elaboración propia.

Reducción de emisiones de NOx y estrategias de postratamiento

El aumento de la relación de compresión tiende a incrementar las emisiones de NOx debido a las mayores temperaturas y presiones en el cilindro, así como al contenido de oxígeno presente en el biodiésel, que favorece la formación de óxidos de nitrógeno (Rao & Prasad, 2022). Para mitigar este efecto se han desarrollado diversas estrategias de postratamiento, como los sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR) y las trampas de NOx (Hernández *et al.*, 2015). Otra alternativa consiste en la dilución de la carga mediante aire o gases de escape, combinada con catalizadores de oxidación (Lee *et al.*, 2014). Aunque estas tecnologías son efectivas, implican mayores costos y complejidad tecnológica (Xie *et al.*, 2016). El catalizador de tres vías (TWC) también puede emplearse para reducir emisiones, ya que convierte CO y HC en productos de oxidación y reduce NOx a N₂ y H₂O. Sin embargo, su funcionamiento requiere una mezcla cercana a la estequiométrica, lo que puede incrementar las pérdidas de bombeo y reducir la eficiencia térmica indicada (Mehra *et al.*, 2017). Otra estrategia consiste en retardar el tiempo de encendido, lo que reduce la temperatura de combustión y la formación de NOx. No obstante, este ajuste también puede disminuir la eficiencia térmica y la potencia del motor en comparación con el tiempo de encendido de máximo par de frenado (MBT) (Lee *et al.*, 2014).

Debido a normativas de emisiones cada vez más estrictas, los motores diésel modernos incorporan sistemas de postratamiento como el catalizador de oxidación diésel (DOC), el filtro de partículas diésel (DPF) y la reducción catalítica selectiva (SCR) (Kang *et al.*, 2018). Asimismo, la recirculación de gases de escape (EGR) es una técnica ampliamente utilizada para disminuir las emisiones de NOx, especialmente en condiciones de alta carga (Krakowian, 2024). El uso de EGR aumenta la capacidad térmica de la mezcla al incorporar gases de escape en la carga, lo que diluye la concentración de oxígeno y reduce la temperatura de combustión (Abdelhameed y Tashima, 2023). Aunque esto disminuye las emisiones de NOx y la tendencia a la detonación, también puede afectar la eficiencia de la combustión e incrementar las emisiones de HC y CO (Lee *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2020). Las Tablas 3, 4 y 5 resumen las estrategias de reducción de NOx mediante EGR, el rendimiento de motores que emplean esta tecnología con combustibles alternativos y una síntesis de las principales estrategias de ajuste para motores que utilizan biodiésel.

Tabla 3. Estrategias en la reducción de NOx empleando EGR.

Tipo de estrategia	Condiciones de operación	Referencia
Combinación de EGR con catalizador de tres vías.	En un motor Ford 2.0 L Zetec se demostró reducción de NOx.	Takaki <i>et al.</i> (2014)
Incremento de EGR de 0% a 35%.	Reduce la detonación y las emisiones de NOx.	Guo <i>et al.</i> (2020)
Incremento de EGR en cargas altas.	Reduce NOx, pero aumenta HC.	Li <i>et al.</i> (2025)
Aplicación de EGR en cargas bajas y altas.	Efecto limitado en NOx a bajas cargas, pero reducción en altas cargas.	Tan <i>et al.</i> (2021)
EGR enfriado.	Reduce la temperatura de combustión y las emisiones de NOx.	Abdelhameed & Tashima (2023)
Incremento de la relación de EGR.	Reduce NOx, pero aumenta CO, HC y humo.	Singhyadav <i>et al.</i> (2012)
5% H ₂ + 20% EGR.	Mejora el par del motor y reduce NOx.	Du <i>et al.</i> (2017)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Rendimiento del motor con EGR usando combustibles alternativos.

Tipo de combustible	Condiciones de operación	Referencia
Biodiésel de aceite de soja	Con 15 % de EGR a 2200 rpm se redujo el NOx, aunque el BTE disminuyó y aumentó el hollín.	Can <i>et al.</i> (2016)
Biodiésel de aceite de palma	El uso de EGR redujo las emisiones de NOx debido a la dilución de oxígeno en la mezcla.	Wu <i>et al.</i> (2022)
Biodiésel de aceite de cocina usado	En un motor CRDI se evaluaron presiones de inyección de 800 y 1600 bar, tiempos de inyección de 25° y 5° BTDC y EGR de 10–30 %. El aumento de EGR incrementó CO y HC y redujo NOx.	Hwang <i>et al.</i> (2014)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Síntesis de estrategias de ajuste para motores que utilizan biodiésel.

Técnica de Ajuste	Parámetro Modificado	Principal Ventaja (Rendimiento)	Principal Desventaja (Emisiones)	Referencias
Relación de Compresión (RC)	Incremento de RC	Mejora la BTE y la potencia	Aumento de NOx y esfuerzo mecánico	Yan <i>et al.</i> (2018), Afzal <i>et al.</i> (2021)
Tiempo de Inyección (TI)	Retardo del tiempo de inyección	Reducción de NOx	Disminución de BTE y aumento de BSFC	Ashok <i>et al.</i> (2017), Palash <i>et al.</i> (2013)
Recirculación de Gases de Escape (EGR)	Incremento del % de EGR	Alta reducción de NOx	Aumento de PM, CO y HC	Can <i>et al.</i> (2016), Palash <i>et al.</i> (2013)
Límite Magro	Aumento de la relación aire/combustible	Reduce NOx y mejora eficiencia térmica	Inestabilidad de combustión y aumento de HC y CO	Mehra <i>et al.</i> (2017), Lee <i>et al.</i> (2014)
Precalentamiento	Temperatura de combustible o aire	Mejora atomización y reduce CO y HC	Incremento de NOx	Srinivasan <i>et al.</i> (2022), Pipitone & Costanza <i>et al.</i> (2018)

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

A partir del análisis sistemático de los parámetros de ajuste de motores para el uso de biodiésel, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. **Desafíos principales:** El uso de biodiésel se asocia con un incremento en las emisiones de NOx y una reducción del poder calorífico del combustible. Las estrategias más efectivas para mitigar estos efectos son la Recirculación de Gases de Escape (EGR) y el retardo del tiempo de inyección. Sin embargo, su aplicación debe ser cuidadosamente controlada para evitar el deterioro de la eficiencia térmica del freno (BTE) y el incremento de las emisiones de partículas (PM) (Babu *et al.*, 2017).
2. **Relación de compresión:** El ajuste de la relación de compresión a valores más elevados mejora significativamente la BTE; no obstante, también incrementa las emisiones de NOx. Este efecto requiere una compensación activa mediante técnicas como la EGR para mantener el cumplimiento de los límites normativos de emisiones.
3. **Equilibrio entre eficiencia y emisiones:** La optimización del motor implica establecer un compromiso entre el desempeño energético y el control de emisiones. Aunque estrategias como la EGR y el retardo del tiempo de inyección permiten reducir las emisiones de NOx, estas pueden afectar la eficiencia térmica y aumentar las emisiones de hollín, por lo que deben implementarse de forma equilibrada.
4. **Combinación sinérgica de técnicas:** La solución más adecuada para el uso de biodiésel radica en la aplicación combinada de diferentes estrategias de ajuste. Por ejemplo, la utilización de EGR junto con ajustes finos en el tiempo de inyección o la operación en condiciones de mezcla magra permite reducir simultáneamente las emisiones de NOx y PM sin comprometer de manera significativa el rendimiento global del motor.
5. **Lagunas de investigación:** A pesar de los avances reportados, aún existe una limitada sistematización en la combinación óptima de parámetros de ajuste para tipos específicos de biodiésel. En este sentido, futuras investigaciones deberían enfocarse en el desarrollo de sistemas de control adaptativos capaces de ajustar dinámicamente los parámetros del motor en función de las condiciones de carga y velocidad.

Finalmente, los resultados analizados evidencian que la optimización de los parámetros de operación del motor constituye un elemento clave para mejorar el desempeño de los combustibles alternativos. En términos prácticos, estos hallazgos pueden contribuir al diseño y calibración de motores de combustión interna que utilicen biodiésel, favoreciendo una operación más eficiente y con menores emisiones contaminantes. De esta manera, el presente estudio aporta una síntesis técnica que permite comprender la interacción entre los principales parámetros de ajuste del motor y su influencia en el rendimiento y las emisiones cuando se emplea biodiésel.

Conflicto de interés

Los autores no tienen conflicto de interés con la investigación realizada.

Referencias

- Abdelaal, M. M., Rabee, B. A., & Hegab, A. H. (2013). Effect of adding oxygen to the intake air on a dual-fuel engine performance, emissions, and knock tendency. *Energy*, 61, 612–620. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.022>
- Abdelhameed, E., & Tashima, H. (2023). EGR and emulsified fuel combination effects on the combustion, performance, and NOx emissions in marine diesel engines. *Energies*, 16(1), 336. <https://doi.org/10.3390/en16010336>
- Abedin, M. J., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Sanjid, A., Rahman, S. M. A., & Masum, B. M. (2013). Energy balance of internal combustion engines using alternative fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.049>
- Afzal, A., Soudagar, M. E. M., Belhocine, A., Kareemullah, M., Hossain, N., Alshahrani, S., Saleel, C. A., Subbiah, R., Qureshi, F., & Mujtaba, M. A. (2021). Thermal performance of compression ignition engine using high content biodiesels: A comparative study with diesel fuel. *Sustainability*, 13(14), 7688. <https://doi.org/10.3390/su13147688>
- Ashok, B., Nanthagopal, K., Karuppa Raj, T. R., Bhasker, P. J. D., & Vignesh, S. (2017). Influence of injection timing and exhaust gas recirculation of a Calophyllum inophyllum methyl ester fuelled CI engine. *Fuel Processing Technology*, 167, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.06.024>
- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., & Mekhilef, S. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2070–2093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>
- Azni, M. A., Md Khalid, R., Hasran, U. A., & Kamarudin, S. K. (2023). Review of the effects of fossil fuels and the need for a hydrogen fuel cell policy in Malaysia. *Sustainability*, 15(5), 4033. <https://doi.org/10.3390/su15054033>
- Babu, V., Murthy, M., & Rao, A. P. (2017). Butanol and pentanol: The promising biofuels for CI engines – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1068–1088. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.038>
- Banapurmath, N. R., Basavarajappa, Y. H., & Tewari, P. G. (2012). Effect of mixing chamber venturi, injection timing, compression ratio and EGR on the performance of dual-fuel engine operated with HOME and CNG. *International Journal of Sustainable Engineering*, 5(3), 265–279. <https://doi.org/10.1080/19397038.2011.603847>
- Bhasker, J. P., & Porpatham, E. (2016). LPG gaseous phase electronic port injection on performance, emission and combustion characteristics of lean burn SI engine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 40, 012069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/40/1/012069>
- Bhasker, J. P., & Porpatham, E. (2017). Effects of compression ratio and hydrogen addition on lean combustion characteristics and emission formation in a compressed natural gas fuelled spark ignition engine. *Fuel*, 208, 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.024>
- Biswakarma, K., Sarmah, P., Paramasivam, P., Dhanasekaran, S., Yadav, S. K., & Kumar, V. (2023). Experimental probe into an automotive engine run on waste cooking oil biodiesel blend at varying engine speeds. *Fuel*, 346, 128364. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128364>
- Bora, B. J., & Sah, U. K. (2016). Optimisation of injection timing and compression ratio of a raw biogas powered dual fuel diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 92, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.111>
- Britto, R. F., & Martins, C. A. (2014). Experimental analysis of a diesel engine operating in diesel-ethanol dual-fuel mode. *Fuel*, 134, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.010>
- Can, Ö., Öztürk, E., Solmaz, H., Aksoy, F., Çinar, C., & Yücesu, H. S. (2016). Combined effects of soybean biodiesel fuel addition and EGR application on the combustion and exhaust emissions in a diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 95, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.056>
- Chintala, V., & Subramanian, K. A. (2017). A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 472–491. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.247>

- Dhar, A., & Agarwal, A. K. (2015). Experimental investigations of the effect of pilot injection on performance, emissions and combustion characteristics of Karanja biodiesel fueled CRDI engine. *Energy Conversion and Management*, 93, 357–366. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.090>
- Doornbos, G., Hemdal, S., & Dahl, D. (2015). Reduction of fuel consumption and engine-out NOx emissions in a lean homogeneous GDI combustion system, utilizing valve timing and an advanced ignition system. *SAE 2015 World Congress & Exhibition, Detroit, Michigan, United States*. <https://doi.org/10.4271/2015-01-0776>
- Du, Y., Yu, X., Liu, L., Li, R., Zuo, X., & Sun, Y. (2017). Effect of addition of hydrogen and exhaust gas recirculation on characteristics of hydrogen gasoline engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(12), 8288–8298. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.197>
- Elkelawy, M., El Shenawy, E. A., Mohamed, S. A., Elarabi, M. M., & Bastawissi, H. A.-E. (2022). Impacts of EGR on RCCI engines management: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management: X*, 14, 100216. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100216>
- Feng, S., Xu, S., Yuan, P., Xing, Y., Shen, B., Li, Z., Zhang, C., Wang, X., Wang, Z., Ma, J., & Kong, W. (2022). The impact of alternative fuels on ship engine emissions and aftertreatment systems: A review. *Catalysts*, 12(2), 138. <https://doi.org/10.3390/catal12020138>
- Gad, M. M., & Ghazaly, N. M. (2023). Evaluation of parameters affecting the performance of the spark ignition engine. *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, 4(2), 216–224. <https://doi.org/10.21608/svusrc.2023.197849.1113>
- Gómez, J. P., Olsen, D. B., & Amell, A. A. (2018). Engine operation just above and below the knocking threshold, using a blend of biogas and natural gas. *Energy*, 153, 719–725. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.079>
- Guo, H., Zhou, S., Zou, J., & Shreka, M. (2020). A numerical investigation on De-NOx technology and abnormal combustion control for a hydrogen engine with EGR system. *Processes*, 8(9), 1178. <https://doi.org/10.3390/pr8091178>
- Han, T., Singh, R., Lavoie, G., Wooldridge, M., & Boehman, A. (2020). Multiple injection for improving knock, gaseous and particulate matter emissions in direct injection SI engines. *Applied Energy*, 262, 114578. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114578>
- Hariram, V., & Shangar, R. V. (2015). Influence of compression ratio on combustion and performance characteristics of direct injection compression ignition engine. *Alexandria Engineering Journal*, 54(4), 807–814. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.06.007>
- Hedfi, H., Jedli, H., Jbara, A., & Slimi, K. (2014). Modeling of a bioethanol combustion engine under different operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 88, 808–820. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.035>
- Hernández, J. J., Lapuerta, M., & Barba, J. (2015). Effect of partial replacement of diesel or biodiesel with gas from biomass gasification in a diesel engine. *Energy*, 89, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.050>
- Hossain, A. K., & Davies, P. A. (2013). Pyrolysis liquids and gases as alternative fuels in internal combustion engines – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 165–189. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.031>
- Hwang, J., Qi, D., Jung, Y., & Bae, C. (2014). Effect of injection parameters on the combustion and emission characteristics in a common-rail direct injection diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel. *Renewable Energy*, 63, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.051>
- Kamboj, S. K., & Karimi, M. N. (2013). The effects of compression ratios and fuels on the energetic, exergetic and ecological efficiency of an air standard Otto cycle. *International Journal of Energy Science*, 3, 320. <https://doi.org/10.14355/ijes.2013.0305.04>
- Kang, W., Choi, B., Jung, S., & Park, S. (2018). PM and NOx reduction characteristics of LNT/DPF+SCR/DPF hybrid system. *Energy*, 123, 439–447. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.133>
- Krakowian, K. (2024). Impact of multi-valve exhaust gas recirculation (EGR) system on nitrogen oxides emissions in a multi-cylinder engine. *Energies*, 17(24), 6473. <https://doi.org/10.3390/en17246473>

- Kumar, S., & Dinesha, P. (2018). Optimization of engine parameters in a biodiesel engine run with honge methyl ester using response surface methodology. *Measurement*, 125, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.091>
- Lee, S., Park, C., Park, S., & Kim, C. (2014). Comparison of the effects of EGR and lean burn on an SI engine fueled by hydrogen-enriched low calorific gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(3), 1086–1095. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.144>
- Li, J., Huang, Z., Tao, B., Sun, X., & Pan, J. (2025). Effects of EGR rate and temperature on combustion and emissions characteristics of compression ignition engines fueled with hydrotreated vegetable oil. *ACS Omega*, 10(5), 2081–2091. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c08533>
- Lindstad, E., Ask, T. Ø., Cariou, P., Eskeland, G. S., & Rialland, A. (2023). Wise use of renewable energy in transport. *Transportation Research Part D*, 119, 103713. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103713>
- Lounici, M. S., Loubar, K., Tarabet, L., Balistrrou, M., Niculescu, D., & Tazerout, M. (2014). Towards improvement of natural gas-diesel dual fuel mode: An experimental investigation on performance and exhaust emissions. *Energy*, 64, 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.091>
- Mashruk, S., Shi, H., Mazzotta, L., Ustun, C. E., Aravind, B., Meloni, R., & Valera-Medina, A. (2024). Perspectives on NOx emissions and impacts from ammonia combustion processes. *Energy & Fuels*, 38, 19253–19292. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c03381>
- McCarthy, P., Rasul, M., & Moazzem, S. (2011). Analysis and comparison of performance and emissions of an internal combustion engine fuelled with petroleum diesel and different bio-diesels. *Fuel*, 90, 2147–2157. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.02.010>
- Mehra, R. K., Duan, H., Juknelevičius, R., Ma, F., & Li, J. (2017). Progress in hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG) internal combustion engines: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1458–1498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.061>
- Mohanasundaram, K. R., & Govindan, N. (2020). Effect of air preheating, exhaust gas recirculation and hydrogen enrichment on biodiesel/methane dual fuel engine. *Thermal Science*, 24(3), 1975–1988.
- Nadaleti, W. C., & Przybyla, G. (2018). Emissions and performance of a spark-ignition gas engine generator operating with hydrogen-rich syngas, methane and biogas blends for application in southern Brazilian rice industries. *Energy*, 154, 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.046>
- Nguyen, Q. T., & Le, M. D. (2022). Effects of compression ratios on combustion and emission characteristics of SI engine fueled with hydrogen-enriched biogas mixture. *Energies*, 15(16), 5975. <https://doi.org/10.3390/en15165975>
- Olabi, A. G., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., Alkhalidi, A., Salameh, T., Abo-Khalil, A. G., Hassan, M. M., & Sayed, E. T. (2022). Battery electric vehicles: Progress, power electronic converters, strength (S), weakness (W), opportunity (O), and threats (T). *International Journal of Thermofluids*, 16, 100212.
- Olson, A. L., Tunér, M., & Verhelst, S. (2025). Investigation of the combustion characteristics and knock tendencies of neat C1–C4 alcohol fuels using a CFR engine. *Fuel*, 381, 133499. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133499>
- Othman, M. F., Adam, A., Najafi, G., & Mamat, R. (2017). Green fuel as alternative fuel for diesel engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 694–709. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.140>
- Palash, S. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Masum, B. M., Sanjid, A., & Abedin, M. J. (2013). State of the art of NOx mitigation technologies and their effect on the performance and emission characteristics of biodiesel-fueled compression ignition engines. *Energy Conversion and Management*, 76, 400–420. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.059>
- Parekh, H., Patel, N., & Pathak, B. (2024). Impact of high blends of Madhuca Logifolia biodiesel on the performance, combustion and emission parameters in a CRDI diesel engine at variable compression ratio. *Transactions on Energy Systems and Engineering Applications*, 5(2), 647.
- Park, C., Lee, S., & Yi, U. (2016). Effects of engine operating conditions on particle emissions of lean-burn gasoline direct-injection engine. *Energy*, 115(Part 1), 1148–1155. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.051>
- Pielecha, I., Szwajca, F., Skobiej, K., Pielecha, J., Merksiz, J., & Cieřlik, W. (2024). Analysis on monofuel: Methane and hydrogen in passive TJI engine using center of combustion and lambda-value control. *International Journal of Hydrogen Energy*, 83, 1170–1183. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.159>

- Pipitone, E., & Costanza, A. (2018). An experimental investigation on the long-term compatibility of preheated crude palm oil in a large compression ignition diesel engine. *Biofuel Research Journal*, 5(4), 900–908. <https://doi.org/10.18331/BRJ2018.5.4.5>
- Prabu, S. S., Asokan, M. A., Prathiba, S., Ahmed, S., & Puthean, G. (2018). Effect of additives on performance, combustion and emission behavior of preheated palm oil/diesel blends in DI diesel engine. *Renewable Energy*, 122, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.068>
- Rahman, S. A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Sanjid, A., & Abedin, M. J. (2014). Assessment of emission and performance of compression ignition engine with varying injection timing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 221–230. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.049>
- Rao, G. P., & Prasad, L. S. V. (2022). Combined influence of compression ratio and exhaust gas recirculation on the diverse characteristics of the diesel engine fueled with novel palmyra biodiesel blend. *Energy Conversion and Management: X*, 14, 100185. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100185>
- Rosha, P., Mohapatra, S. K., Mahla, S. K., Cho, H., Chauhan, B. S., & Dhir, A. (2019). Effect of compression ratio on combustion, performance, and emission characteristics of compression ignition engine fueled with palm (B20) biodiesel blend. *Energy*, 178, 676–684. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.185>
- Selva, R. S. S., Raj, E. R., Jose, M. D. F., & Kennedy, R. Z. (2015). Effect of compression ratio with biodiesel and its blends on performance and emission characteristics of an IC engine. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 16(2), 601–609. https://www.researchgate.net/publication/286265728_Effect_of_compression_ratio_with_biodiesel_and_its_blends_on_performance_and_emission_characteristics_of_an_IC_engine
- Sharma, A., & Murugan, S. (2015). Potential for using a tyre pyrolysis oil-biodiesel blend in a diesel engine at different compression ratios. *Energy Conversion and Management*, 93, 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.023>
- Siddique, M. B. M., Khairuddin, N., Ali, N. A., Hassan, M. A., Ahmed, J., Kasem, S., Tabassum, M., & Afrouzi, H. N. (2021). A comprehensive review on the application of bioethanol/biodiesel in direct injection engines and consequential environmental impact. *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 100092. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100092>
- Singhyadav, V., Soni, S. L., & Sharma, D. (2012). Performance and emission studies of direct injection C.I. engine in dual fuel mode (hydrogen-diesel) with EGR. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 3807–3817. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.04.163>
- Söyler, H. (2025). Boost pressure influence on combustion, emission characteristics, and performance of diesel engines with various fuel types. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 63, 101983. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.101983>
- Srinivasan, G. R., Jambulingam, R., Gacem, A., Ahmad, A., Bhutto, J. K., Yadav, K. K., Mezni, A., Alharbi, O. K. R., Islam, S., Ahn, Y., & Jeon, B.-H. (2022). Effect of fuel preheating on engine characteristics of waste animal fat-oil biodiesel in compression ignition engine. *Polymers*, 14(18), 3896. <https://doi.org/10.3390/polym14183896>
- Stylianidis, N., Azimov, U., Maheri, A., Tomita, E., & Kawahara, N. (2017). Chemical kinetics and CFD analysis of supercharged micro-pilot ignited dual-fuel engine combustion of syngas. *Fuel*, 203, 591–606. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.125>
- Takaki, D., Tsuchida, H., Kobara, T., & Akagi, M. (2014). *Study of an EGR system for downsizing turbocharged gasoline engine to improve fuel economy*. SAE Technical Paper, 2014-01-1199. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1199>
- Tan, Z., Wang, J., Chen, W., Shen, L., & Bi, Y. (2021). Study on the influence of EGR on the combustion performance of biofuel diesel at different ambient simulated pressures. *Sustainability*, 13(14), 7862. <https://doi.org/10.3390/su13147862>
- Tangoz, S., Akansu, S. O., Kahraman, N., & Malkoc, Y. (2015). Effects of compression ratio on performance and emissions of a modified diesel engine fueled by HCNG. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.058>
- Teoh, Y. H., Huspi, H. A., How, H. G., Sher, F., Din, Z. U., Le, T. D., & Nguyen, H. T. (2021). Effect of intake air temperature and premixed ratio on combustion and exhaust emissions in a partial HCCI-DI diesel engine. *Sustainability*, 13(15), 8593. <https://doi.org/10.3390/su13158593>

- Thangamani, S., Sundaresan, S. N., Kannappan, S., Barawkar, V. T., & Jeyaseelan, T. (2021). Impact of biodiesel and diesel blends on the fuel filter: a combined experimental and simulation study. *Energy*, 227, 120526. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120526>
- Ushakov, S., Valland, H., & Asoy, V. (2013). Combustion and emissions characteristics of fish oil fuel in a heavy-duty diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 65, 228–238. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.009>
- Uyumaz, A. (2018). Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with mustard oil biodiesel fuel blends at different engine loads. *Fuel*, 212, 256–267. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.005>
- Wang, J., Xing, S., Huang, Y., Fan, P., Fu, J., Yang, G., Yang, L., & Lv, P. (2017). Highly stable gasified straw slag as a novel solid base catalyst for the effective synthesis of biodiesel: characteristics and performance. *Applied Energy*, 190, 703–712. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.004>
- Woldetensy, H. Z., Zeleke, D. S., & Tibba, G. S. (2025). Study of the impact on emissions and engine performance of diesel fuel additives made from cotton and castor blended seed oils. *Heliyon*, 11(1), e41659. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41659>
- Wu, G., Ge, J. C., Kim, M. S., & Choi, N. J. (2022). NOx–smoke trade-off characteristics in a palm oil-fueled CRDI diesel engine under various injection pressures and EGR rates. *Applied Sciences*, 12(3), 1069. <https://doi.org/10.3390/app12031069>
- Xie, F., Li, X., Su, Y., Hong, W., Jiang, B., & Han, L. (2016). Influence of air and EGR dilutions on improving performance of a high compression ratio spark-ignition engine fueled with methanol at light load. *Applied Thermal Engineering*, 94, 559–567. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.046>
- Xiong, Q., Duan, Y., Liang, D., Li, T., Luo, H., & Chen, R. (2024). Biofuels and their blends—A review of the effect of low carbon fuels on engine performance. *Sustainability*, 16(23), 10300. <https://doi.org/10.3390/su162310300>
- Yaliwal, V. S., Banapurmath, N. R., Gireesh, N. M., & Tewari, P. G. (2014). Production and utilization of renewable and sustainable gaseous fuel for power generation applications: a review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 608–627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.043>
- Yan, F., Xu, L., & Wang, Y. (2018). Application of hydrogen enriched natural gas in spark ignition IC engines: from fundamental fuel properties to engine performances and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(1), 1457–1488. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.227>
- Yang, M., & Wang, Y. (2023). Application of Miller cycle and net-zero fuel(s) to diesel engine: effect on the performance and NOx emissions of a single-cylinder engine. *Energies*, 16(5), 2488. <https://doi.org/10.3390/en16052488>
- Zhang, F., Wang, Z., Tian, J., Li, L., Yu, K., & He, K. (2020). Effect of EGR and fuel injection strategies on the heavy-duty diesel engine emission performance under transient operation. *Energies*, 13(3), 566. <https://doi.org/10.3390/en13030566>