

## Desempeño de un motor diésel que opera con mezclas biodiésel-diésel de aceite residual y de *Jatropha curcas*

Guillermo Benítez Olivares <sup>1</sup>, Alejandro Torres Aldaco <sup>1,\*</sup>, Raúl Lugo Leyte <sup>1</sup>, Helen Denise Lugo Méndez <sup>2</sup>, Sergio Castro Hernández <sup>1</sup>, Ladislao Eduardo Méndez Cruz <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco No. 186, Colonia Leyes de Reforma 1ª Sección, 09310, Alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Departamento de Procesos y Tecnología, Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa, Av. Vasco de Quiroga No. 4871, Colonia Santa Fé Cuajimalpa, 05348, Cuajimalpa, Ciudad de México, México.

<sup>3</sup> División de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial, Tecnológico Nacional de México/TES de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Col. Valle de Anáhuac, Ecatepec de Morelos 55210, México.

\* Autor de correspondencia: [ata@xanum.uam.mx](mailto:ata@xanum.uam.mx)

### Energías Renovables (Biocombustibles)

Recibido: 20 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 14 de febrero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.533>

**Resumen:** El uso de biodiésel representa una alternativa sostenible al diésel convencional, al contribuir significativamente a la reducción de emisiones contaminantes como dióxido de carbono, compuestos de azufre, hidrocarburos aromáticos y partículas sólidas. En este estudio se evaluó el desempeño de un motor diésel operando con mezclas de biodiésel obtenido a partir de aceite de *Jatropha curcas* y aceite comestible residual. La síntesis del biodiésel se realizó mediante un proceso de transesterificación, utilizando hidróxido de sodio como catalizador y una relación molar metanol:aceite de 6:1, en un reactor tipo batch. Se prepararon dos mezclas: B10 (90 % diésel 10 % biodiésel) y B20 (80 % diésel 20 % biodiésel). Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un motor diésel TQ-Plint "Merlín 2", monocilíndrico, de cuatro tiempos y enfriado por aire, acoplado a un dinamómetro. Se analizaron parámetros clave para evaluar el desempeño del motor: potencia generada, torque, eficiencia térmica y consumo específico de combustible. Además, se realizó un análisis paramétrico de estas variables en función de la velocidad de giro del motor, dentro del rango de 1,500 a 1,900 rpm. Los resultados evidencian que la mayor potencia generada se obtuvo con diésel puro, alcanzando 330 W a una velocidad de 2,300 rpm. Sin embargo, las mezclas B10 y B20 presentan un comportamiento competitivo, lo que sugiere su viabilidad como combustibles alternativos en motores diésel convencionales.

**Palabras clave:** biodiésel, *Jatropha curcas*, aceite residual, motor diésel, eficiencia térmica, mezclas B10 y B20

## Performance of a diesel engine operating with biodiesel-diesel blends from waste oil and *Jatropha curcas*

**Abstract:** The use of biodiesel represents a sustainable alternative to conventional diesel, significantly contributing to the reduction of pollutant emissions such as carbon dioxide, sulfur compounds, aromatic hydrocarbons, and particulate matter. In this study, the performance of a diesel engine operating with biodiesel blends derived from *Jatropha curcas* oil and waste cooking oil was evaluated. The biodiesel was synthesized through a transesterification process, using sodium hydroxide as a catalyst and a methanol-to-oil molar ratio of 6:1, in a batch-type reactor. Two blends were prepared: B10 (90% diesel, 10% biodiesel) and B20 (80% diesel, 20% biodiesel). Experimental tests were carried out on a TQ-Plint "Merlin 2" diesel engine, a single-cylinder, four-stroke, air-cooled engine coupled to a dynamometer. Key parameters were analyzed to assess engine performance: power output, torque, thermal efficiency, and specific fuel consumption. Additionally, a parametric analysis of these variables was conducted as a function of engine speed, ranging from 1,500 to 1,900 rpm. The results show that the highest power output was achieved with pure diesel, reaching 330 W at a speed of 2,300 rpm. However, the B10 and B20 blends demonstrated competitive performance, suggesting their feasibility as alternative fuels in conventional diesel engines.

**Keywords:** biodiesel, *Jatropha curcas*, waste oil, diesel engine, thermal efficiency, B10 and B20 blends

### Introducción

La creciente preocupación por la disminución de las reservas de petróleo, así como por los impactos ambientales asociados a la combustión de combustibles fósiles, ha impulsado la búsqueda de fuentes energéticas sostenibles. En este contexto, los biocombustibles y en particular el biodiésel, han cobrado una relevancia creciente como alternativa viable para reducir la dependencia del diésel convencional y mitigar las emisiones contaminantes. De acuerdo con datos de Petróleos Mexicanos (PEMEX), el consumo nacional de diésel asciende a aproximadamente 180 mil barriles diarios,

mientras que, a nivel internacional, se estima que la producción de biodiésel alcanza los 259 mil barriles diarios según *The Economist*. Este panorama justifica el interés por evaluar el desempeño de motores que operan con mezclas biodiésel-diésel, especialmente a partir de fuentes no comestibles y residuales como el aceite usado de cocina y el aceite de *Jatropha curcas*. Este biocombustible se obtiene a través de la transesterificación de triglicéridos de origen vegetal o animal con un alcohol, lo que resulta en ésteres monoalquilos de ácidos grasos de cadena larga. El biodiésel es un combustible renovable, no tóxico y biodegradable, con propiedades similares al diésel convencional utilizado en automotores. Puede ser mezclado con diésel en diversas proporciones, como B5, B10, B20, entre otras, sin requerir modificaciones sustanciales en los motores (Selvan *et al.*, 2022). Una de las principales ventajas del biodiésel con respecto al diésel convencional es su propiedad lubricante, que ayuda a prolongar la vida útil del motor. Además, el biodiésel es menos inflamable, posee un número de cetano superior en un 50%, tiene un mayor punto de ignición y presenta una mayor lubricidad. A diferencia del diésel derivado del petróleo, el biodiésel no contribuye al aumento de los niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub> durante su combustión, esto lo convierte en una opción más ecológica (Palani *et al.*, 2022; Farouk *et al.*, 2024). En términos ambientales, el biodiésel representa una alternativa más limpia y renovable al diésel convencional. Se ha estimado que, el uso de una tonelada de biodiésel puede evitar la emisión de 2.5 toneladas de CO<sub>2</sub>, además de eliminar las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), lo que reduce considerablemente la formación de lluvias ácidas (Solaymani, 2023). Además, su uso en motores de combustión interna ha demostrado ser eficaz en la reducción de emisiones de hollín y otros contaminantes (Riojas-González *et al.*, 2024). Sin embargo, a pesar de sus ventajas, el biodiésel presenta algunos desafíos. En particular, el uso de biodiésel puede incrementar las emisiones de NO<sub>x</sub> y afectar el desempeño del motor, como la potencia, el torque, el consumo específico de combustible y la corrosión en el sistema de combustión. Las mezclas de biodiésel-diésel, comúnmente utilizadas en proporciones como B10 (10% biodiésel y 90% diésel) o B20 (20% biodiésel y 80% diésel), se han convertido en una opción frecuente para evaluar el impacto de este biocombustible en motores de combustión interna (Arya *et al.*, 2022; Xue, 2013).

El motor de combustión interna convierte la energía química del combustible en energía mecánica. A través del proceso de combustión, el combustible se oxida dentro del motor, liberando calor a presión constante, como consecuencia se incrementa su temperatura, posteriormente se expande provocando el movimiento del pistón y produciendo trabajo (Atadashi *et al.*, 2010). La eficiencia y las emisiones de estos motores dependen de varios factores, como la relación aire-combustible, la mezcla de combustible utilizada y las velocidades de giro (rpm). En los motores diésel, la relación de compresión es considerablemente mayor que en los motores a gasolina, lo que mejora la eficiencia térmica, pero también genera desafíos en términos de emisiones de NO<sub>x</sub> (Roy *et al.*, 2014). El comportamiento de los motores de combustión interna también está influenciado por las características del combustible.

El desempeño del motor varía en función de las propiedades del combustible, las velocidades de giro y otros parámetros operativos. La ignición del combustible en un motor diésel depende de la temperatura generada por la compresión del aire, lo que influye directamente en la eficiencia de la combustión (Selvan *et al.*, 2022). A pesar de que el biodiésel ofrece ventajas en términos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y SO<sub>x</sub>, su impacto en el desempeño del motor y las emisiones de NO<sub>x</sub> debe ser evaluado cuidadosamente. Por otro lado, las pérdidas mecánicas en un motor de combustión interna, que provienen principalmente de la fricción entre los pistones y las paredes del cilindro, afectan la eficiencia global del motor. Estas pérdidas también están relacionadas con la potencia requerida para la inyección de combustible, lo cual influye en el desempeño general del sistema (Kheiralipour *et al.*, 2024). Este estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño de un motor diésel utilizando mezclas de biodiésel derivado de aceites residuales y aceite de *Jatropha curcas*. A través de este análisis, se pretende determinar el impacto de diferentes proporciones de biodiésel en el desempeño del motor, las emisiones y la eficiencia térmica, así como las ventajas y limitaciones de usar biodiésel como sustituto del diésel convencional.

## Materiales y Métodos

El estudio se llevó a cabo utilizando diésel comercial y mezclas de biodiésel-diésel, las cuales fueron elaboradas con biodiésel producido previamente mediante transesterificación a partir de aceite residual de cocina y aceite de *Jatropha curcas*. El biodiésel obtenido cumple con la norma ASTM D6751, con una viscosidad de 4.1 mm<sup>2</sup>/s, una densidad de 880 kg/m<sup>3</sup> y un contenido de ésteres metílicos (FAME) del 96.5%. Además, se determinó su poder calorífico inferior, obteniéndose un valor promedio de 38,936 kJ/kg. A partir de este biodiésel, se prepararon dos mezclas con diferentes concentraciones: B10 (10% biodiésel y 90% diésel) y B20 (20% biodiésel y 80% diésel). Estas

mezclas fueron evaluadas para analizar el desempeño de un motor diésel en condiciones controladas. El motor utilizado en el estudio fue un TQ-Plint "Merlín 2" (Figura 1), modelo monocilíndrico de cuatro tiempos, enfriado por aire. Este motor estuvo acoplado a un dinamómetro para medir su desempeño. Las especificaciones técnicas del motor son las siguientes:

- Velocidad de giro máxima: 2,400 rpm
- Potencia generada: 1.5 kW
- Relación de compresión: 19:1
- Volumen desplazado: 0.28 litros
- Diámetro del cilindro: 73 mm
- Carrera: 67 mm

El motor operó dentro de un rango de temperatura ambiente que varió entre 20 °C y 35 °C y una humedad relativa que osciló entre 30% y 95%. El ciclo termodinámico del motor se describe mediante cuatro procesos fundamentales:



Figura 1. Motor diésel acoplado a un dinamómetro.

**Compresión isoentrópica:** El proceso de compresión es desde 0.78 bar a 48.12 bar (proceso 1-2). **Suministro de calor a presión constante:** El calor se suministra al motor manteniendo una presión constante durante el proceso 2-3. **Expansión isoentrópica:** En este proceso, la presión cae de 48.12 bar a 2.05 bar (proceso 3-4). **Rechazo de calor a volumen constante:** Finalmente, el calor se rechaza a volumen constante (proceso 4-1). Los procesos termodinámicos descritos se ilustran en los diagramas temperatura-entropía (Figura 2a) y presión-volumen (Figura 2b). Las pruebas se realizaron operando el motor a diversas velocidades de giro y evaluando los parámetros de desempeño, como la potencia generada, el consumo de combustible y las emisiones, con cada mezcla de biodiésel estudiada y diésel comercial. Durante los ensayos, se monitorearon las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad, para asegurar que las pruebas se realizaban dentro del rango óptimo de operación del motor.

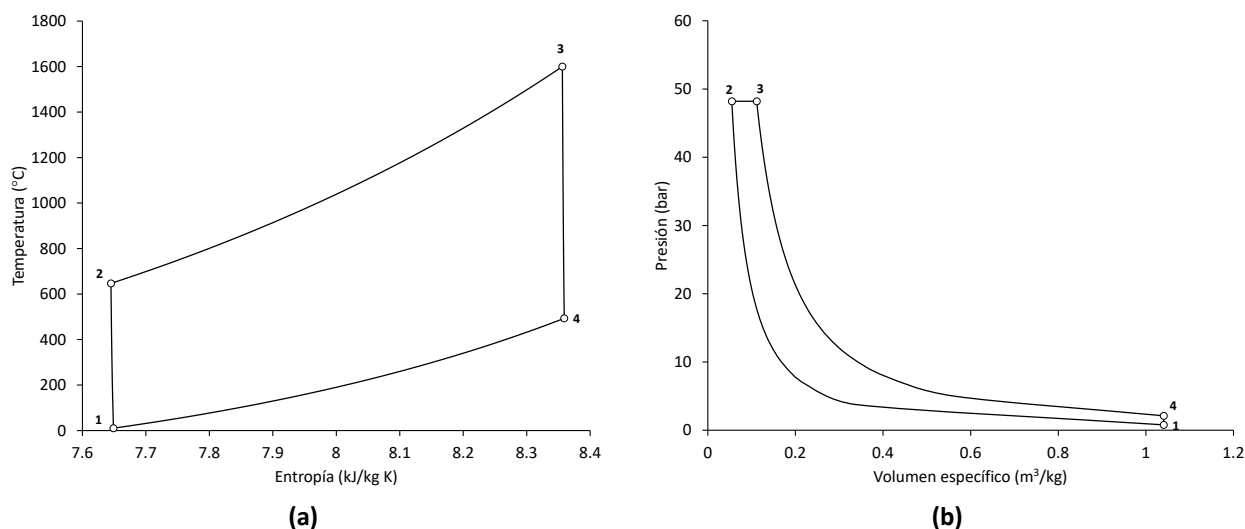


Figura 2. Diagrama Temperatura – Entropía y Presión – Volumen específico del ciclo diésel

Las pruebas en el motor iniciaron a una velocidad de giro de 1,500 rpm en el dinamómetro, la velocidad de giro se fue incrementado en 100 rpm, en cada prueba, se monitoreó, el comportamiento del torque y el consumo de combustible. Las mediciones se realizaron en la alcaldía Iztapalapa de la Ciudad de México. Las condiciones ambientales durante las pruebas fueron: temperatura ambiente 20°C, velocidad del viento 13 km/h y humedad relativa del 39%. Los parámetros obtenidos en el desempeño del motor son: la potencia generada, la eficiencia térmica y el consumo específico de

combustible, para las mezclas de biodiésel, así como para el diésel, se realizó un análisis paramétrico, en función de la velocidad de giro del motor en un rango de operación de 1,500 rpm a 1,900 rpm. Si bien en este estudio no se realizó un análisis estadístico formal como ANOVA o pruebas post hoc (por ejemplo, Tukey), se reconoce su utilidad y se contempla su aplicación en futuros trabajos para fortalecer la comparación entre combustibles.

## Resultados y Discusión

Las Figuras 2a y 2b muestran los estados termodinámicos del motor diésel utilizado en las pruebas con las mezclas biodiésel-diésel. El diagrama T-s (temperatura-entropía) revela que la temperatura en la cámara a la salida de la combustión alcanzó los 1,600 °C ( $T_3$ ), mientras que la temperatura de los gases de escape fue de 400 °C ( $T_4$ ). Se consideró un ciclo ideal, con procesos de compresión y expansión isoentrópicos (1–2) y (3–4). La Figura 2b presenta el diagrama P-v (presión-volumen específico) para el motor, con una relación de compresión de 19:1. A partir de este diagrama, se obtuvo una presión  $P_2$  de 48.12 bar. Se asumió un volumen muerto de 0.1 litros y una relación de corte de 2.0, que son representaciones estándar para este tipo de motor.

Cabe destacar que las altas temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión, especialmente en condiciones de operación con mezclas B20, pueden favorecer la formación de óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos altamente contaminantes que contribuyen al smog fotoquímico y a problemas respiratorios. Esta posible desventaja ambiental del biodiésel, asociada al incremento térmico, no fue cuantificada en el presente estudio, pero constituye una línea de investigación relevante. En trabajos futuros será fundamental incluir mediciones de emisiones para evaluar de manera más completa el impacto ambiental del uso de biodiésel como combustible alternativo.

La Figura 3 ilustra el comportamiento del flujo másico de combustible en función de la velocidad de giro del motor para las mezclas biodiésel-diésel y diésel puro. El flujo fue medido utilizando un caudalímetro digital integrado al banco de pruebas, lo cual permitió obtener lecturas continuas y precisas. Se observa que, al incrementar la velocidad de giro del motor, también aumenta el flujo másico de combustible, lo que se traduce en un mayor consumo. En el intervalo de operación entre 1,400 rpm y 2,400 rpm, inicialmente considerado, se observó que el motor presentaba un comportamiento inestable fuera del rango comprendido entre 1,500 rpm y 1,900 rpm, por lo cual el análisis se centró en este último. En este rango, el diésel presentó un comportamiento lineal en el consumo de combustible, pasando de 0.072 kg/h a 0.118 kg/h, lo que representa un aumento aproximado del 63.6%. En comparación, la mezcla B20 Residual mostró un consumo de 0.108 kg/h a 1,500 rpm, y a la velocidad máxima de 1,900 rpm, el consumo alcanzó 0.144 kg/h, lo que representa un incremento del 33% en el flujo de combustible. La mezcla B10 Residual presentó un comportamiento similar, con un consumo de 0.108 kg/h a 1,500 rpm y de 0.144 kg/h a 1,900 rpm. En el caso de la mezcla B20 *Jatropha*, el flujo de combustible fue de 0.100 kg/h a 1,500 rpm y aumentó a 0.136 kg/h a 1,900 rpm, lo que indica un incremento del 36.36%. Por su parte, la mezcla B10 *Jatropha curcas* mostró un consumo de combustible de 0.0936 kg/h a 1,500 rpm, el cual aumentó progresivamente conforme se incrementó la velocidad de giro del motor.

La Figura 4 muestra el comportamiento de la potencia generada por el motor diésel al utilizar distintas mezclas de biodiésel-diésel (B10 Residual, B10 *Jatropha curcas*, B20 Residual, B20 *Jatropha curcas*) y diésel puro, en función de la velocidad de giro del motor. A bajas velocidades de giro, se observaron diferencias significativas en el desempeño de los combustibles. La mezcla B10 *Jatropha curcas*, a 900 rpm, produjo una potencia de 75 W. Por su parte, la mezcla B20 *Jatropha curcas*, a 1,100 rpm, también alcanzó 75 W. La mezcla B10 Residual, a 1,400 rpm, generó una potencia de 90 W, mientras que el diésel, a 1,200 rpm, generó igualmente 75 W. Estos resultados indican que las mezclas de biodiésel, especialmente las que provienen de *Jatropha curcas*, tuvieron un comportamiento similar a bajas velocidades de giro, con variaciones menores en la potencia generada. En el intervalo de 1,400 rpm a 2,000 rpm, todos los combustibles estudiados presentaron un comportamiento similar, con una variación en la potencia generada de no más del 10%, alcanzando una potencia máxima de entre 280 W y 300 W. Este comportamiento es indicativo de que, en este rango de velocidad, el desempeño de las mezclas biodiésel-diésel y del diésel puro es comparable. Sin embargo, el diésel puro, debido a su mayor velocidad máxima de giro de 2,300 rpm, logró generar una potencia máxima de 350 W, superando a las mezclas biodiésel-diésel.

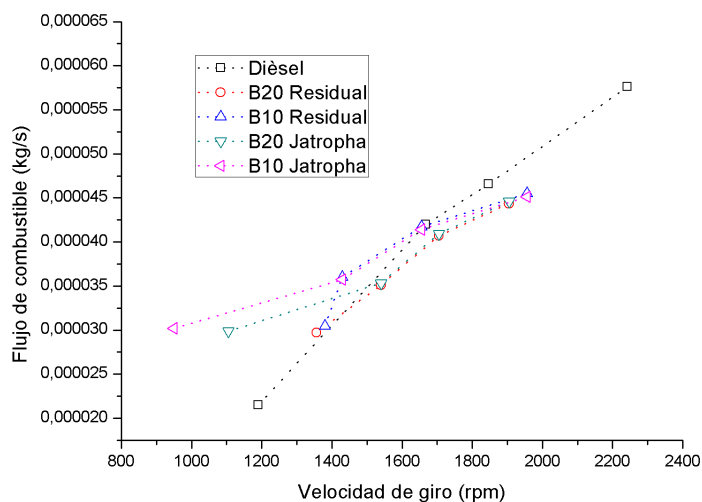


Figura 3. Flujo de combustible en función de la velocidad de giro, para las mezclas biodiésel-diésel y diésel

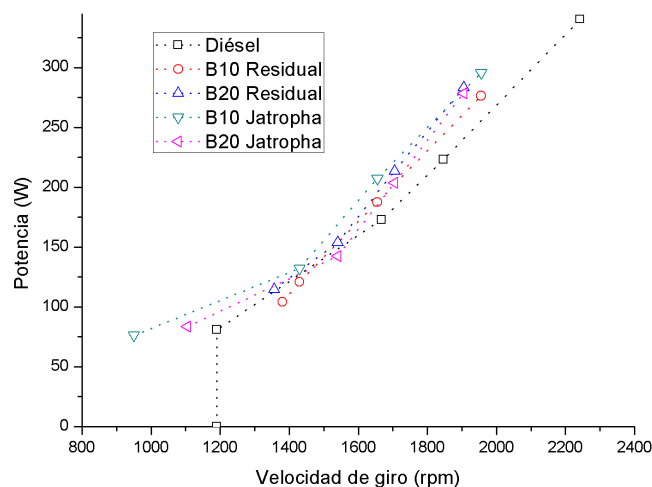


Figura 4. Potencia generada en función de la velocidad de giro, para las mezclas biodiésel-diésel y diésel

La Figura 5 muestra a la eficiencia térmica para cada combustible a las distintas velocidades de giro. A 900 rpm, la mezcla B10 *Jatropha curcas* presentó una eficiencia térmica de 6%, y para las otras mezclas B20 alcanzó una eficiencia de 6.5% a 1,100 rpm. En comparación, la mezcla B20 Residual, a la misma velocidad, mostró una eficiencia térmica de 10%, y el diésel puro alcanzó 8% a 1,200 rpm. Estos resultados reflejan que las mezclas con aceite residual (B20 Residual) tuvieron una mayor eficiencia térmica que las mezclas con aceite de *Jatropha curcas*, así como el diésel, a bajas velocidades de giro. Al incrementar la velocidad de giro a 1,400 rpm, la mezcla B10 Residual destacó significativamente, alcanzando una eficiencia térmica de 22%, lo que contrasta notablemente con las otras mezclas biodiésel-diésel y el diésel, cuyas eficiencias térmicas no superaron el 8%. Este aumento en la eficiencia térmica podría estar relacionado con el comportamiento de la mezcla, que presentó una mayor densidad energética y mejor combustión en comparación con las otras mezclas.

A 2,000 rpm, la eficiencia térmica de la mezcla B10 Residual alcanzó 28%, y para las otras mezclas, su eficiencia térmica se mantuvo en 15%, y el diésel se alcanzó una eficiencia térmica de 10%. Este comportamiento sugiere que la mezcla B10 Residual es mejor en términos de aprovechamiento del calor generado, este resultado la posiciona como la mezcla más destacada entre las muestras estudiadas. Incluso a la máxima velocidad de giro de 2,300 rpm, el diésel presentó una eficiencia térmica máxima de solo 13%, inferior a la obtenida con la mezcla B10 Residual en todo el intervalo de velocidades evaluadas. Los resultados indican que, todas las mezclas de biodiésel-diésel presentaron un desempeño competitivo respecto a los resultados del diésel puro en términos de la potencia generada, la mezcla B10 Residual destaca en la eficiencia térmica, esto sugiere que dicha mezcla podría ser una opción más eficiente y sostenible para motores diésel en aplicaciones donde la eficiencia energética sea un factor clave.

La Figura 6 presenta las eficiencias volumétricas alcanzadas por las distintas mezclas de biodiésel-diésel y diésel puro en función de la velocidad de giro del motor. A 900 rpm, la mezcla B10 *Jatropha curcas* alcanzó una eficiencia volumétrica del 34%, lo que indica un buen aprovechamiento del volumen de combustible en ese rango de velocidades de giro. En comparación, la mezcla B20 Residual a 1,100 rpm mostró una eficiencia volumétrica de 25%, mientras que la mezcla B20 *Jatropha curcas* presentó una eficiencia de 27% en el mismo intervalo de velocidad de giro.

La mezcla B10 Residual, a 1,400 rpm, su eficiencia volumétrica fue de 20%, que representa una disminución en comparación con las mezclas de *Jatropha curcas*. A 1,200 rpm, el diésel alcanzó una eficiencia volumétrica de 45%, sobresaliendo notablemente respecto a las mezclas biodiésel-diésel en esta velocidad. Este comportamiento indica que, en bajas revoluciones, el diésel tiene una ventaja en términos de eficiencia volumétrica, lo que puede deberse a una combustión más eficiente y una mayor densidad energética. Al incrementar la velocidad de giro a 2,000 rpm, todas las mezclas de biodiésel-diésel presentaron eficiencias volumétricas entre 28% y 30%, esto sugiere una estabilización del desempeño volumétrico en este rango de velocidades.

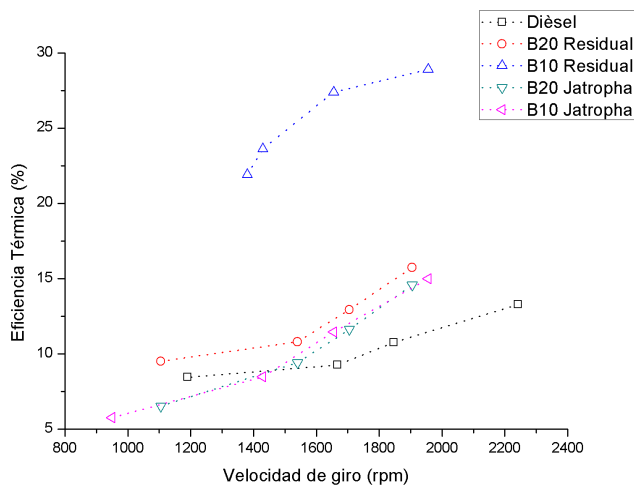


Figura 5. Eficiencia térmica en función de la velocidad de giro, para las mezclas de biodiésel–diésel y diésel

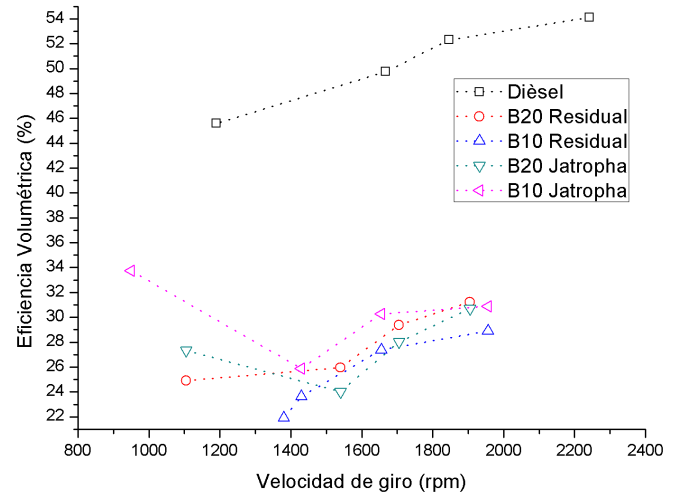


Figura 6. Eficiencia volumétrica en función de la velocidad de giro, para todas las mezclas de biodiésel, diésel y diésel

En cambio, el diésel, a 2,300 rpm, alcanzó una eficiencia volumétrica de 45%, manteniendo su superioridad en cuanto al aprovechamiento del volumen de combustible. En términos generales, el diésel presentó una eficiencia volumétrica 50% mayor en todas las velocidades de giro estudiadas, en comparación con las mezclas de biodiésel–diésel. Este resultado refuerza la idea que, las mezclas de biodiésel pueden ofrecer un desempeño competitivo en cuanto a potencia y eficiencia térmica, el diésel sigue siendo más eficiente en términos volumétricos, especialmente en rangos de velocidad más altos. Este comportamiento podría estar relacionado con las características propias de las mezclas de biodiésel, por su menor densidad energética y el comportamiento de la combustión que no siempre es óptimo en el aprovechamiento del volumen del combustible.

La Figura 7 muestra el flujo de calor suministrado al motor diésel por las mezclas de biodiésel–diésel y el diésel, en función de la velocidad de giro, cuando se incrementa la velocidad de giro del motor, el flujo de calor se incrementa proporcionalmente en todos los casos. El diésel a 2,400 rpm provoca que ingrese mayor flujo de calor al motor de 2.6 kW, esto es debido al mayor poder calorífico del diésel, mientras que las mezclas de biodiésel–diésel a 2,000 rpm el flujo de calor suministrado al motor está en el intervalo de 1.8 a 1.9 kW. La mezcla B10 *Jatropha curcas* a 900 rpm proporcionó el mayor flujo de calor al motor, esto se debe a que la mezcla tiene un punto de ignición menor, debido a esto puede operar a una velocidad de giro menor que las otras mezclas y el diésel.

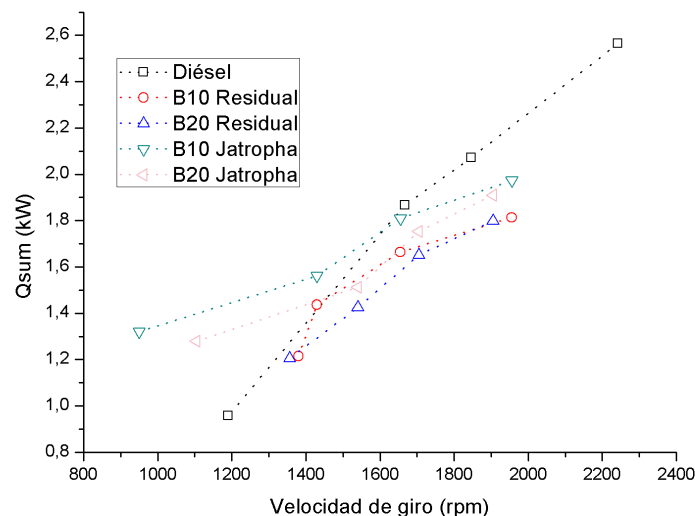


Figura 7. Flujo de calor suministrado al motor en función de la velocidad de giro, para todas las mezclas estudiadas de biodiésel–diésel y diésel

## Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio indican que, las mezclas biodiésel-diésel pueden emplearse de manera eficiente en motores diésel convencionales, sin requerir ajustes significativos en su operación, particularmente dentro del intervalo de 1,500 a 1,900 rpm. En este rango, el desempeño del motor en términos de potencia generada, eficiencia térmica y consumo de combustible fue comparable al del diésel convencional. El comportamiento operativo fue similar entre las mezclas elaboradas con biodiésel a partir de aceite residual y aquellas con aceite de *Jatropha curcas*, lo cual sugiere que la fuente del biocombustible no introduce diferencias significativas en el funcionamiento del motor. Esto refuerza la viabilidad de utilizar materias primas locales o de desecho como insumos para la producción de biodiésel, con beneficios tanto económicos como ambientales. Desde un punto de vista práctico, estas mezclas representan una alternativa técnica viable en aplicaciones de media carga y condiciones de operación estables, como en maquinaria agrícola, transporte público urbano o sistemas estacionarios. En condiciones de alta exigencia térmica o elevada demanda de carga, puede ser más adecuado el uso de diésel puro. El uso de biodiésel podría contribuir a la reducción de emisiones contaminantes y a la disminución en la dependencia de combustibles fósiles. Sin embargo, este estudio presenta algunas limitaciones importantes: las pruebas se realizaron en un solo tipo de motor y no se contemplaron mediciones de emisiones como óxidos de nitrógeno (NOx) o material particulado (PM), las cuales son fundamentales para una evaluación ambiental completa. Como líneas futuras de investigación, se recomienda ampliar el estudio a distintos tipos de motores y condiciones de operación, así como realizar pruebas de larga duración que incluyan el análisis de emisiones, desgaste de componentes y estabilidad de desempeño a lo largo del tiempo. Esto permitirá validar con mayor solidez el uso de mezclas biodiésel-diésel en escenarios industriales.

## Bibliografía

- Arya, M., Rout, A. K., & Samanta, S. (2022). A review on the effect of engine performance and emission characteristics of C.I. engine using diesel–biodiesel–additives fuel blend. *Materials Today: Proceedings*, 51(Part 8), 2224–2232. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.359>
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., & Abdul Aziz, A. (2010). High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1999–2008. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.020>
- Farouk, S. M., Tayeb, A. M., Abdel-Hamid, S. M. S., & Osman, R. M. (2024). Recent advances in transesterification for sustainable biodiesel production, challenges, and prospects: A comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 12722–12747. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32027-4>
- Kheiralipour, K., Khoobakht, M., & Karimi, M. (2024). Effect of biodiesel on environmental impacts of diesel mechanical power generation by life cycle assessment. *Energy*, 289, 129948. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129948>
- Palani, Y., Devarajan, C., Manickam, D., & Thanikodi, S. (2022). Performance and emission characteristics of biodiesel-blend in diesel engine: A review. *Environmental Engineering Research*, 27(1). <https://doi.org/10.4491/eer.2020.338>
- Riojas-González, H. H., Reta Heredia, I., Bortoni Anzures, L. J., & Martínez Torres, J. J. (2024). Desempeño en el motor diésel con la aplicación del biodiésel. *Ingeniería y Desarrollo*, 42(1), 1. <https://doi.org/10.14482/inde.42.01.791.582>
- Roy, M. M., Wang, W., & Alawi, M. (2014). Performance and emissions of a diesel engine fueled by biodiesel–diesel, biodiesel–diesel-additive and kerosene–biodiesel blends. *Energy Conversion and Management*, 84, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.033>
- Selvan, B. K., Das, S., Chandrasekar, M., Girija, R., John Vennison, S., Jaya, N., Saravanan, P., Rajasimman, M., Vasseghian, Y., & Rajamohan, N. (2022). Utilization of biodiesel blended fuel in a diesel engine – Combustion engine performance and emission characteristics study. *Fuel*, 311, 122621. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122621>
- Solaymani, S. (2023). Biodiesel and its potential to mitigate transport-related CO<sub>2</sub> emissions. *Carbon Research*, 2, 38. <https://doi.org/10.1007/s44246-023-00067-z>
- Xue, J. (2013). Combustion characteristics, engine performances and emissions of waste edible oil biodiesel in diesel engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 350–365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.039>