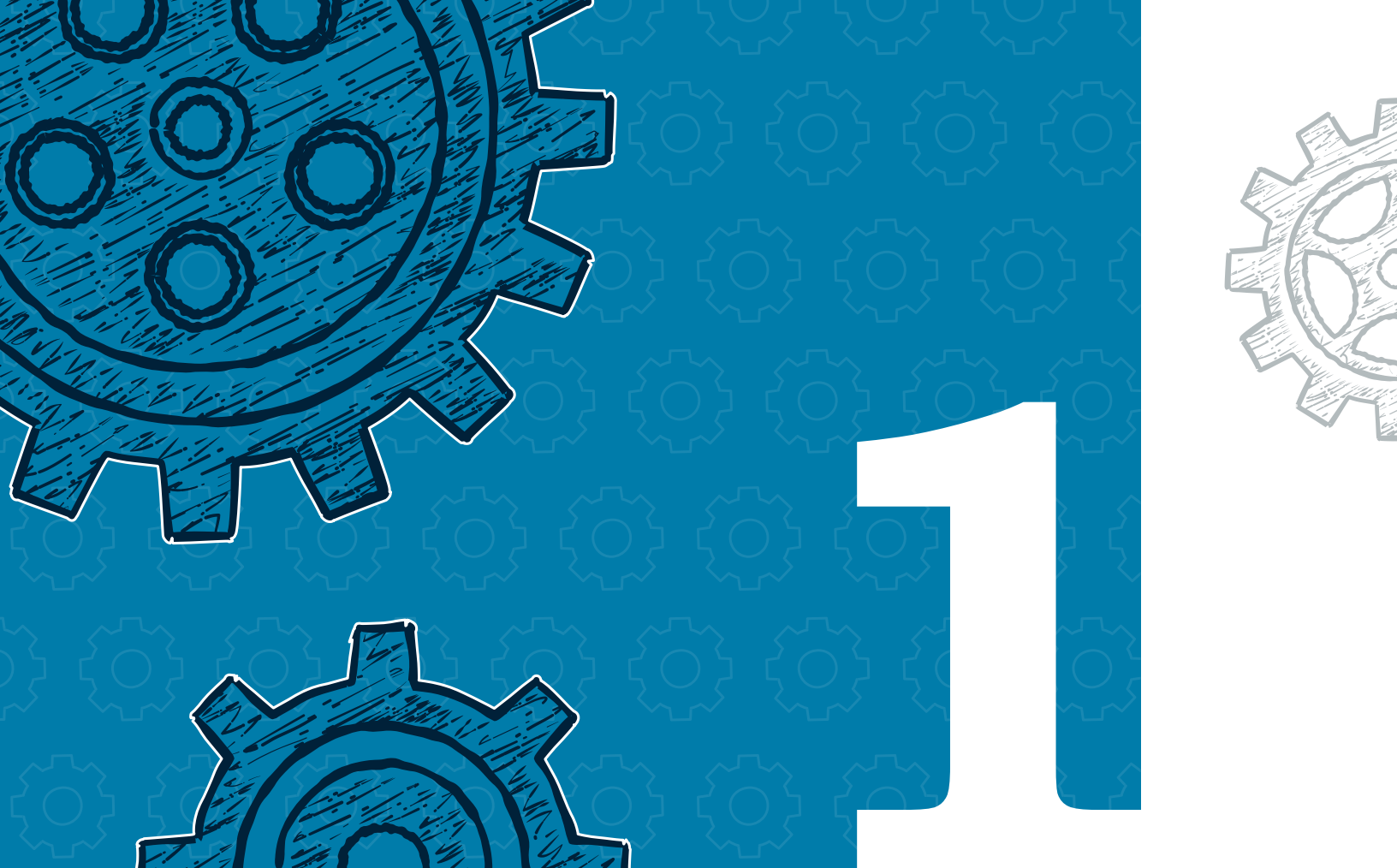




ESTUDIO DE LAS PRESTACIONES Y DENSIDAD DE HUMOS DE UN MOTOR DIÉSEL AL USAR UNA MEZCLA DE GASOLINA - DIÉSEL MODIFICANDO EL TIEMPO DE INYECCIÓN

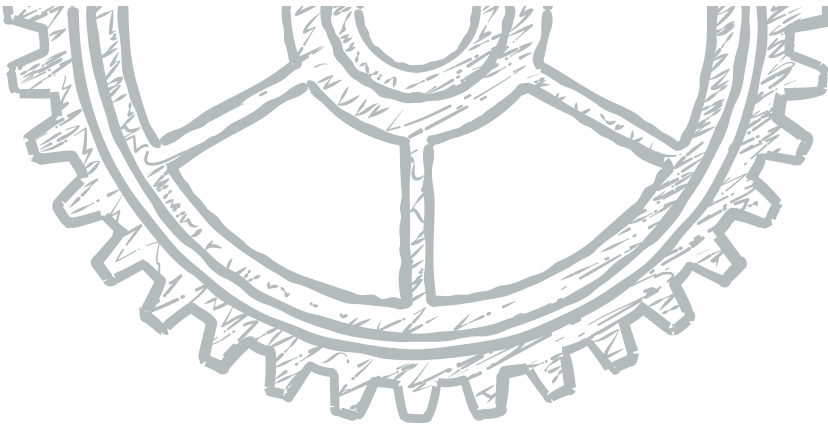
STUDY OF THE PERFORMANCE AND SMOKE DENSITY OF A DIESEL ENGINE WHEN USING A GASOLINE - DIESEL MIXTURE BY MODIFYING THE INJECTION TIME

¹Oscar Hernando Venegas Pereira

²Luisa Fernanda Mónico Muñoz

¹Oscar Hernando Venegas Pereira, profesor de planta del programa de Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia, oscar.venegas@escuelaing.edu.co, Índice h4 Google Scholar, <https://orcid.org/0000-0001-6903-4100>

²Luisa Fernanda Mónico Muñoz, profesora asociada II del programa de Ingeniería Aeronáutica, Fundación Universitaria los Libertadores, FULL, Colombia, luisa.monico@libertadores.edu.co, Índice h5 Google Scholar, <https://orcid.org/0000-0002-3597-6332>



RESUMEN

El mundo enfrenta una grave crisis ambiental causada en gran parte por las emisiones contaminantes de los motores diésel. Aunque estos motores son más eficientes, sus emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas dependen de la calidad del combustible. En Colombia se han realizado esfuerzos para mejorar los carburantes, pero aún existe una brecha frente a los de alta calidad, lo que limita la adopción de tecnologías más limpias y mantiene un parque automotor con motores Euro 3 y Euro 4. Una alternativa para reducir las emisiones es el uso de aditivos químicos que mejoren las propiedades del combustible o el empleo de mezclas de gasolina y diésel. Estas mezclas se evaporan con mayor facilidad, favoreciendo una combustión más homogénea y eficiente.

Para evaluar los efectos de una mezcla gasolina-diésel en un motor diésel, se realizaron ensayos en banco motor utilizando una mezcla G10 (10 % gasolina y 90 % diésel). Los resultados muestran que, al ajustar el tiempo de inyección —ya sea avanzando o retrasándolo—, se pueden mantener las prestaciones del motor con reducciones mínimas y disminuir la densidad de humos. En general, el avance en el tiempo de inyección ofrece los mejores resultados sin afectar significativamente el rendimiento.

PALABRAS CLAVE: aditivo; gasolina; densidad de humos; Motor de Combustión Interna Alternativo (MCIA); prestaciones.

ABSTRACT

The world is facing a serious environmental crisis largely caused by pollutant emissions from diesel engines. Although these engines are more efficient, their emissions of nitrogen oxides (NOx) and particulate matter depend on fuel quality. In Colombia, efforts have been made to improve fuel quality; however, a significant gap remains compared to high-quality fuels, limiting the adoption of cleaner technologies and maintaining a vehicle fleet composed mainly of Euro 3 and Euro 4 engines. One alternative to reduce emissions is the use of chemical additives that enhance fuel properties or the use of gasoline–diesel blends. These blends evaporate more easily, promoting more homogeneous and efficient combustion. To evaluate the effects of a gasoline–diesel blend in a diesel engine, tests were carried out on an engine test bench using a G10 mixture (10% gasoline and 90% diesel). The results show that by adjusting the injection timing—either advancing or retarding it—it is possible to maintain engine performance with minimal reductions while decreasing smoke density. In general, advancing the injection timing provides the best results without significantly affecting engine performance.

KEYWORDS: additive; gasoline; smoke density; Internal Combustion Engine (ICE); performance.

DOI capítulo: <https://doi.org/10.64351/978-628-97363-0-4.cap.1>

INTRODUCCIÓN

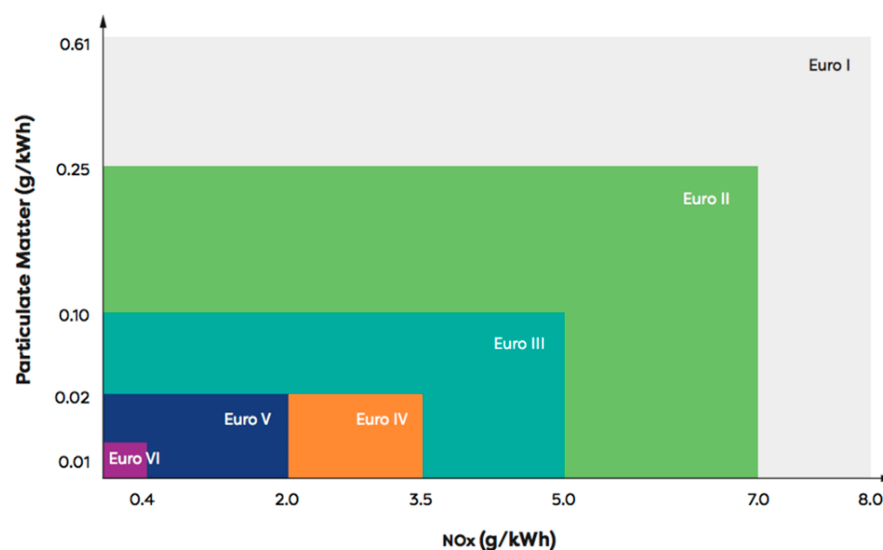
En los últimos años, el mundo se ha visto en la necesidad de enfrentar y buscar soluciones a diversas problemáticas medioambientales derivadas del uso indiscriminado de determinados recursos y prácticas, tales como la deforestación, el crecimiento demográfico, el uso de pesticidas y productos químicos, la elevada producción de residuos industriales, urbanos y domésticos, la radiación, la expansión industrial y el uso de combustibles fósiles.

Para el año 2022 se registró un incremento considerable en las emisiones de gases de efecto invernadero, según el informe de las Naciones Unidas. Durante ese año se produjeron 57,4 gigatoneladas (Gt) de dióxido de carbono (CO_2), de las cuales el 65 % fueron generadas por la combustión de combustibles fósiles (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2023).

Desde 1988, la Unión Europea estableció la normativa denominada Euro 0, implementada con el propósito de fijar límites a la generación de emisiones contaminantes provenientes de los vehículos, ante la creciente problemática ambiental que afecta al planeta y que se ha vuelto cada vez más crítica. Con el paso del tiempo, esta normativa se ha vuelto más estricta. Su objetivo, mediante la implementación de las normas Euro 6 y Euro 7 —esta última prevista para entrar en vigencia en 2025—, es reducir en un 40 % las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por los motores de combustión interna con respecto a los niveles de 1990 (Comisión Europea, 2019), contribuyendo así a mitigar el calentamiento global.

La evolución de las normas medioambientales, como se muestra en la Figura 1, ha impulsado la implementación y el desarrollo de nuevos productos y sistemas tecnológicos. En la etapa Euro 0, se optimizó la inyección en precámara y la inyección mecánica, alcanzando menores presiones en el interior de la cámara de combustión, lo cual permitió reducir el ruido de la combustión. En las Euro 1, se introdujo el uso de turbocompresores y se incrementó la presión de inyección gracias a los avances logrados con el sistema Common Rail. Para la Euro 3, se implementó la inyección electrónica, se modificó el diseño de las cabezas de los pistones, se desarrollaron nuevos tipos de inyectores y se aplicaron mayores presiones de inyección junto con estrategias de inyección retardada. Finalmente, en las Euro 5, se incorporaron sistemas de postratamiento de gases (Olipes, 2024).

Figura 1. Evolución de normativas Euro desde su creación



Nota. Tomada de Aecc (2024).

Es por esta razón que los fabricantes de sistemas de propulsión se han visto obligados a desarrollar estrategias e investigaciones orientadas a reducir las emisiones contaminantes que afectan tanto al medio ambiente como a la salud humana a nivel mundial, sin que dichas estrategias comprometan el funcionamiento ni las prestaciones del motor.

A pesar de que las regulaciones son cada vez más estrictas y que las nuevas tecnologías implementadas cumplen con los requisitos de las normas vigentes, la mayoría de las emisiones generadas aún proviene de combustibles de origen fósil. En países en vía de desarrollo como Colombia, existe un notable atraso tecnológico: del 100 % de los vehículos diésel que operan en el país, el 25 % del parque automotor corresponde a tecnologías pre-Euro, el 60 % a Euro 2 y solo el 15 % a tecnología Euro 4. Estos vehículos producen niveles de contaminación por material particulado hasta un 95 % mayores con respecto a la norma actual (Ministerio de Ambiente, 2020).

En los últimos 30 años, los niveles de óxidos de nitrógeno (NOx) y de partículas de materia (PM) se han reducido casi en un orden de magnitud, como se muestra en la Figura 1. Sin embargo, la disminución simultánea de estas dos emisiones contaminantes en motores diésel no resulta sencilla, ya que ambos contaminantes presentan comportamientos opuestos, fenómeno conocido como el dilema diésel o *trade-off* entre partículas de materia y NOx (Mónico Muñoz, 2013). En consecuencia, cualquier acción dirigida a disminuir los niveles de NOx tiende a aumentar la cantidad de partículas, y viceversa.

Los óxidos de nitrógeno (NOx) son una mezcla de gases compuestos por nitrógeno y oxígeno. El monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) son los más relevantes desde el punto de vista toxicológico y los más perjudiciales para la salud (ATSDR, 2024). El término NOx se refiere a la combinación de ambas sustancias. El NOx constituye el principal contaminante de este grupo y se forma por el exceso de oxígeno en una combustión pobre, la cual combina el nitrógeno del aire debido a las altas presiones y temperaturas alcanzadas durante el proceso (PRTR, 2024).

Las partículas de materia (PM) comprenden cualquier sustancia presente en los gases de escape que se encuentre en estado líquido o sólido en condiciones aproximadamente ambientales. Entre más pequeña sea la partícula, mayor será su impacto perjudicial. La mayoría de estas partículas se forma como resultado de reacciones químicas complejas entre sustancias como el dióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (Air Central Texas, 2024).

Otro contaminante relevante es el dióxido de carbono (CO₂), un gas de efecto invernadero que atrapa el calor y proviene de la extracción y quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), de incendios forestales y de procesos naturales como las erupciones volcánicas. Se trata de un gas incoloro, inodoro, ligeramente ácido, no inflamable y compuesto por oxígeno y carbono, considerado una de las principales causas del calentamiento global. Este contaminante se asocia directamente con el consumo de combustible (Climate NASA, 2024; PRTR España, 2024).

También se encuentran los hidrocarburos sin quemar (HC), resultado de un exceso de combustible en la mezcla. Una combustión deficiente, causada por la falta de oxígeno, impide que todo el combustible se queme. Asimismo, una mezcla pobre con baja velocidad de inflamación puede generar residuos de hidrocarburos no quemados (Gasogenio, 2024).

Para implementar correctamente las tecnologías Euro 6 y, posteriormente, la Euro 7, la calidad de los combustibles constituye un factor limitante, ya que el carburante nacional no cumple con ciertos valores de referencia, como el número de cetano. Este parámetro incide en el encendido del combustible y en el proceso de combustión, afectando directamente la cantidad de emisiones contaminantes producidas.

En consecuencia, la ausencia de una tecnología local avanzada que permita producir un combustible diésel ajustado a los estándares internacionales (Euro 6), en los que el contenido máximo de azufre permitido es de 10 ppm, contrasta con el valor vigente en Colombia, que alcanza 50 ppm (Ministerio de Ambiente y Ministerio de Energía, 2020), es decir, cinco veces más de lo permitido. Considerando esta crisis ambiental global y el atraso tecnológico de los países en desarrollo como Colombia, surge la necesidad de buscar soluciones que permitan disminuir las emisiones contaminantes de los motores diésel con tecnologías entre Pre-Euro y Euro 6, sin afectar las prestaciones ni el rendimiento de estos sistemas de propulsión (Reitz et al., 2020).

Para enfrentar esta problemática, se han propuesto e implementado diversas alternativas, entre ellas la electrificación vehicular. No obstante, esta opción presenta limitaciones y genera interrogantes, ya que puede resultar incluso más perjudicial que los motores diésel o de gasolina debido al alto impacto ambiental asociado a su fabricación. Los motores eléctricos se caracterizan por sus casi nulas emisiones y su alta eficiencia; sin embargo, presentan desventajas como la baja autonomía, los elevados costos de los vehículos y la necesidad de una infraestructura adecuada que garantice una movilidad eficiente.

Asimismo, con el propósito de reducir simultáneamente los niveles de NOx y partículas, se han propuesto nuevos conceptos de combustión. Estos se basan en el desarrollo de procesos con dosados relativos locales menores a 2 y con temperaturas de combustión inferiores a 2200 K. En este contexto, han surgido soluciones centradas en sistemas de combustión de baja temperatura controlada por mezcla y en combustión en fase premezclada (Payri, 2012).

En los conceptos de combustión de baja temperatura controlada por mezcla se busca mejorar la interacción del aire hasta la sección de *lift-off*, de modo que el dosado local relativo disminuya, empleando altas tasas de recirculación de gases de escape (EGR). Este enfoque permite reducir de forma simultánea los niveles de NOx y de partículas, aunque penaliza el rendimiento indicado del motor. Por su parte, los conceptos de combustión en fase premezclada buscan aumentar el tiempo de retraso de encendido (*ignition delay*, ID), mediante la modificación del punto de inyección o el uso de altas tasas de EGR. Esta estrategia logra reducciones significativas de NOx y partículas, aunque presenta la dificultad de obtener una mezcla completamente homogénea antes del autoencendido (Mónico Muñoz, 2013).

Dentro del grupo de conceptos de combustión en fase premezclada, y considerando el momento de inyección del combustible, estos pueden clasificarse en los siguientes tipos:

Inyección indirecta

La forma más sencilla de obtener una mezcla homogénea consiste en inyectar el combustible aguas arriba de la válvula de admisión, de modo que la mezcla aire-combustible ingrese al cilindro durante la carrera de admisión. El concepto más representativo de este tipo de combustión es el CAI (Controlled Auto Ignition) (Mónico Muñoz, 2013).

Inyección directa

Consiste en inyectar el combustible directamente en la cámara de combustión. Este tipo de inyección puede realizarse de dos maneras: inyectando el combustible muy tarde, cerca del punto muerto superior (PMS), o inyectándolo muy temprano durante la carrera de compresión. Para obtener una mezcla homogénea de aire y combustible dentro del cilindro, se emplean los conceptos de inyección adelantada de una porción o de la cantidad total del combustible.

El proceso de combustión ocurre cerca del PMS, lo que permite alcanzar un elevado rendimiento del motor. No obstante, presenta el inconveniente del impacto del combustible sobre las paredes del cilindro, especialmente cuando se utiliza diésel convencional. La estrategia de inyección directa puede implementarse mediante uno o varios inyectores.

En este grupo destacan los conceptos HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition, ignición por compresión de una carga homogénea) y PCCI (Premixed Charge Compression Ignition, ignición por compresión de una carga premezclada), debido a su facilidad de implementación. Asimismo, se incluyen los conceptos UNIBUS (Uniform Bulky Combustion System), HIMICS (Homogeneous Charge Intelligent Multiple Injection Combustion System), NADI (Narrow Angle Direct Injection), MULDIC (Multiple Stage Diesel Combustion) y PREDIC (Premixed Lean Diesel Combustion) (Mónico Muñoz, 2013).

Por su parte, en los conceptos de inyección directa retrasada, la temperatura y la densidad del gas disminuyen debido al movimiento de expansión del pistón, lo que provoca largos retrasos de autoencendido y mejora la formación de la mezcla. La forma de la curva de la tasa de liberación de calor comienza a modificarse: la fracción de premezcla aumenta, mientras que la combustión por difusión adquiere menor relevancia.

Este comportamiento, junto con el uso de altas tasas de recirculación de gases de escape (EGR), permite que el tiempo de retraso sea lo suficientemente prolongado como para formar mezclas completamente homogéneas, reduciendo así las emisiones de NO_x y de partículas. Esta estrategia de inyección también evita los problemas asociados con el impacto del combustible en las paredes del cilindro y con el inicio prematuro de la combustión.

Los conceptos más representativos de esta categoría son el MK (Modulated Kinetics), el HCLI (Homogeneous Charge Late Injection) y el HPLI (Highly Premixed Late Injection) (Mónico Muñoz, 2013).

Inyección mixta

Este concepto combina las características de una inyección indirecta y una inyección directa, lo que permite obtener un grado adicional de libertad al posibilitar la formación de una carga estratificada dentro del cilindro. El HCDC (*Homogeneous Charge Diesel Combustion*) es el concepto más estudiado dentro de la categoría de inyección mixta.

En términos generales, al comparar los conceptos anteriores con una combustión convencional, se observa que los niveles de NO_x se reducen de forma significativa, las partículas de materia disminuyen ligeramente, mientras que el CO y los HC tienden a incrementarse. El rendimiento indicado, por su parte, se mantiene en valores similares a los observados en la operación convencional.

Por otro lado, se destaca el empleo de combustibles alternativos, entre los cuales se encuentra el biodiésel, un combustible biodegradable y no tóxico (se degrada cuatro veces más rápido que el diésel convencional), reciclable, localmente disponible, libre de benceno, más limpio que los combustibles fósiles, fácil de producir, almacenar y utilizar, y con el potencial de reducir los niveles de material particulado, CO, HC y CO₂ (Venegas & Mónico, 2021; Mónico Muñoz, 2013). Este combustible puede emplearse puro o en diversas mezclas con el diésel estándar, debido a su miscibilidad con el combustible convencional (Bunce, 2010). Además, posee una excelente lubricidad, lo que evita el deterioro de la vida útil del motor y no requiere modificaciones en el hardware del mismo (Mustafa, 2007).

El biodiésel puede producirse de manera económica en una amplia gama de contextos, tanto urbanos como rurales, y a diferentes escalas, a partir de diversas semillas oleaginosas como girasol, palma, soja, colza, algodón, cacahuete, entre otras.

A nivel nacional, en Colombia, desde 2021 el país ha comercializado en promedio unas 50 mil toneladas de biodiésel anualmente. En 2023 se vendieron 700 kt de biodiésel, lo que representó un aumento del 2 % con respecto al año 2022. Para 2024, se proyecta alcanzar las 708 kt. Actualmente, el combustible distribuido en el país contiene un 10 % de biodiésel de aceite de palma y bioetanol de caña de azúcar. Los principales productores de biodiésel son Manuelita, BioD, Ecodiesel, Bgreen, BioSC, Oleoflores, La Paz, Biocastilla, Alpo y Odin; mientras que los de bioetanol son Incauca, Providencia, Manuelita, Mayagüez, Riopaila, Risaralda y Bioenergy. Según el *Reporte Anual 2023* de Fedebiocombustibles (2023), el *Programa Nacional de Biocombustibles* ha evitado la emisión de cerca de 34 millones de toneladas de CO₂ desde 2011 y la producción de aproximadamente 800 toneladas de material particulado.

Se afirma comúnmente que la producción de biodiésel es de ciclo cerrado, ya que el CO₂ emitido durante su combustión es absorbido por las plantas utilizadas para su producción. El prensado de las semillas de estas plantas, combinado con procesos de extracción, permite obtener el aceite vegetal necesario como materia prima. Este aceite, refinado en algunos casos, reacciona con un alcohol —generalmente metanol— para originar biodiésel mediante un proceso de transesterificación, cerrando así el ciclo (Pardal, 2012). La transesterificación consiste en la reacción entre las grasas presentes en un aceite vegetal y un alcohol de cadena corta, usualmente metanol o etanol, generando como productos los ésteres (biodiésel) y la glicerina (Reategui Romero, 2013).

Asimismo, los combustibles sintéticos forman parte de los combustibles alternativos más destacados, no solo por su contribución a la reducción de emisiones contaminantes, sino también por su capacidad para disminuir el consumo específico de combustible, lo que los posiciona en ventaja frente al biodiésel y el bioetanol. Entre ellos sobresalen el Biomass-to-Liquid (BTL), el diésel Fischer-Tropsch, el biodiésel sintético, el biometanol, los alcoholes pesados y el biodimetiléter (Mónico Muñoz, 2013). Sin embargo, estos combustibles presentan la desventaja de ser económicamente más costosos, lo que limita su producción e implementación a gran escala.

Dentro de los dispositivos desarrollados para reducir la contaminación de los vehículos se encuentra el AdBlue, un aditivo compuesto principalmente de urea que se inyecta en los gases de escape antes de su paso por el catalizador. La urea contiene amoníaco y, gracias a las altas temperaturas del catalizador, reacciona con los NO_x, produciendo N₂, CO₂ y vapor de agua (Vilacarburants, 2024; Ro-des, 2024). Los catalizadores tienen como objetivo disminuir los agentes contaminantes en los gases de escape mediante reacciones catalíticas de oxidación y reducción (Autonocion, 2024). El catalizador-acumulador de NO_x retiene este contaminante hasta que es regenerado para su eliminación, y surge como complemento del catalizador de tres vías (Pauly, 2012).

Los filtros de partículas, introducidos en 2009 y conocidos también como filtros de partículas diésel (DPF), retienen el hollín generado durante la combustión del diésel, eliminándolo posteriormente mediante oxidación. Estos filtros atrapan químicamente diversos agentes nocivos, como las partículas PM₁₀ y PM_{2.5} (CarandDriver, 2024; Landrover, 2024). Por su parte, la recirculación de gases de escape (EGR, por sus siglas en inglés: *Exhaust Gas Recirculation*) reduce las emisiones de óxidos de nitrógeno generadas durante la combustión, al redirigir una porción de los gases de escape hacia la cámara de combustión, donde se mezclan con el aire y el combustible, disminuyendo así la temperatura del proceso y la formación de NO_x (HRmotor, 2024).

Otra alternativa en desarrollo en países industrializados consiste en mejorar la calidad de los combustibles (Winkler et al., 2018; Serrano et al., 2019; Kozina et al., 2020). En naciones como Colombia y otras de América Latina, se ha propuesto el uso de aditivos que mejoran las propiedades del combustible, mitigando el impacto ambiental y manteniendo o mejorando el rendimiento de los motores, además de avanzar en el desarrollo de combustibles alternativos compatibles con nuevas tecnologías (MinAmbiente-MinEnergía, 2020; Reitz et al., 2020; Posada et al., 2018; Zhang et al., 2022; Chen et al., 2022; Gad et al., 2022; Etaiw et al., 2022; Subbiah et al., 2022).

Los aditivos son sustancias químicas que se añaden en pequeñas cantidades a un producto con el fin de mejorar sus propiedades o eliminar características indeseables. En el caso de los combustibles, los aditivos son miscibles y mejoran el rendimiento del motor al optimizar la combustión, reduciendo emisiones y, en algunos casos, aumentando la eficiencia (Danilov, 2015; El-Seesy et al., 2019; Mägi, 2015).

El uso de aditivos comenzó en la década de 1920, cuando se descubrió su capacidad para elevar el número de octano de los combustibles. Sin embargo, su aplicación disminuyó en los años setenta con la caída del precio del petróleo (Palencia Zapico et al., 2014). Los aditivos oxigenados incrementan el contenido de oxígeno en el combustible, favoreciendo una combustión más completa y reduciendo las emisiones de CO, material particulado (PM) e HC. Entre los más comunes se encuentran los alcoholes (metanol, etanol, isopropanol, terc-butanol e isobutanol) y los éteres (MTBE, MTAE y ETBE), con cadenas de uno a seis átomos de carbono (Patil & Taji, 2013; Palencia Zapico et al., 2014; Kumar & Reddy, 2021; Shoar et al., 2021). Desde el punto de vista económico, estos aditivos han contribuido a estabilizar los precios del petróleo y, en algunos países, su uso es obligatorio para reducir las emisiones contaminantes (Rivas Meza, 2006).

Entre los estudios realizados, se han desarrollado investigaciones con el aditivo Octamix en pequeñas concentraciones (Simsek et al., 2021) y con tolueno (Venkatesan, 2021) en motores diésel de cuatro tiempos monocilíndricos. Los resultados evidenciaron un incremento en el rendimiento térmico efectivo debido al aumento del contenido de oxígeno y una reducción en el consumo específico de combustible, al comparar el diésel convencional con el combustible dopado. En cuanto a las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y monóxido de carbono (CO), los resultados fueron diversos: en algunos casos se incrementaron, debido al aumento de la temperatura en el cilindro —ya que las moléculas de nitrógeno reaccionan con el oxígeno—, mientras que en otros disminuyeron. Finalmente, las emisiones de humo se redujeron en comparación con el diésel convencional, ya que la mezcla se empobreció en zonas ricas, permitiendo una combustión más eficiente (Simsek et al., 2021; Venkatesan, 2021).

Asimismo, las mezclas de gasolina-diésel pueden emplearse para alcanzar determinadas características de encendido ideales en conceptos avanzados de combustión, disminuyendo los niveles de emisiones producidas.

También se han aplicado aditivos a combustibles provenientes del proceso de transesterificación, como el biodiésel, con el objetivo de mejorar sus propiedades al mezclarse con diésel convencional (Venegas & Mónico, 2021). Se han utilizado aditivos como dimetil carbonato (DMC) y pentanol (n-P) (Rangabashiam et al., 2020). Los resultados mostraron una reducción en la viscosidad, lo que permite una mejor atomización y una mezcla más homogénea, además de un menor consumo específico de combustible. Esto favorece una combustión más eficiente y un menor tiempo de retraso, asociado a un mayor número de cetano, lo cual reduce el ruido del motor. Asimismo, la presión en el cilindro se incrementó, mejorando el desempeño general.

En cuanto a las emisiones, los NOx no presentaron variaciones significativas con respecto al biodiésel puro; sin embargo, las emisiones de humo se redujeron aún más al incorporar estos aditivos. De igual forma, las emisiones de CO fueron inferiores, debido a una combustión con mayor contenido de oxígeno, menor viscosidad y mejor atomización; por consiguiente, las emisiones de HC también disminuyeron.

Por otra parte, se ha investigado el uso de nano-aditivos como el Al_2O_3 (Venu & Appavu, 2020) o el CuO, los cuales mejoran la conductividad térmica del combustible. Los resultados indicaron que la presión dentro del cilindro aumenta gracias a la mayor eficiencia de transferencia de calor. Además, durante el proceso de combustión, las moléculas de oxígeno liberadas por los nano-aditivos incrementan la velocidad de combustión y reducen el tiempo de retraso al elevar el número de cetano. En cuanto al rendimiento térmico efectivo, aunque el diésel convencional presenta

valores superiores al biodiésel puro, la adición del nano-aditivo permite aumentar dicho rendimiento y reducir el consumo específico de combustible, debido a la mejora en la oxidación y la eficiencia de la combustión. Una de las principales ventajas del uso de nano-aditivos es su capacidad para disminuir las emisiones de NO_x, una de las principales limitaciones del uso del biodiésel.

En el estudio de Rami Reddy et al. (2020), se evaluó un biodiésel a base de semillas de mango. Los resultados mostraron que la mezcla MSME20 presentó los mejores parámetros de rendimiento. Para optimizar aún más el desempeño del motor, se adicionó decanol en tres concentraciones (5 %, 10 % y 15 % en volumen). Se evidenció que la adición del 5 % de decanol mejoró significativamente la eficiencia térmica en un 3,19 % y redujo las emisiones de HC, CO y humo. No obstante, se observó un leve incremento en las emisiones de NO_x a plena carga.

Otra alternativa que se ha investigado en motores de encendido por compresión es el uso de gasolina convencional. La gasolina se caracteriza por ser más volátil, menos densa y más resistente al autoencendido que el diésel convencional. Las mezclas de gasolina-diésel poseen una mayor facilidad de evaporación y formación de mezclas homogéneas, lo que las convierte en una opción idónea (Gautam, 2010; Leif, 2010; Shaohua, 2005). Estas mezclas, al tener un menor número de cetano, incrementan el tiempo de retraso y, en consecuencia, favorecen un mayor grado de mezcla antes del autoencendido.

Diversas investigaciones, como las de Han et al. (Dong, 2010) y Sahin (Z., 2008), recomiendan no emplear mezclas de gasolina con una concentración volumétrica superior al 40 %, ya que ello incrementa la inestabilidad de la combustión y provoca el fenómeno de *knock* o golpeteo. En los motores diésel, las mezclas gasolina-diésel prolongan el tiempo de retraso, permitiendo que una mayor cantidad de combustible se queme cerca del punto muerto superior, lo que conduce a reducciones simultáneas de NO_x y partículas.

En el trabajo de Gautam et al. (2010), se utilizó un motor diésel monocilíndrico con una relación de compresión de 15,8:1. Se compararon tres combustibles diferentes: un diésel europeo con un índice de cetano (CN) de 56, una gasolina europea de 95 RON y 85 MON con un CN estimado de 16, y otra gasolina de 84 RON y 78 MON (CN estimado de 21). Los resultados mostraron una reducción significativa de las emisiones de humo al emplear gasolina; sin embargo, las emisiones de HC y CO fueron mayores. Los autores concluyeron que, a diferencia del diésel, es posible inyectar grandes cantidades de gasolina en etapas tempranas del ciclo sin provocar una liberación significativa de calor durante la compresión, lo que permite modelar el perfil de liberación de calor y reducir las emisiones contaminantes (Gautam, 2010).

Leif et al. (2010), en un motor monocilíndrico de encendido por compresión, probaron cuatro combustibles dentro del rango de ebullición del diésel y tres en el rango de ebullición de la gasolina. Concluyeron que los combustibles con propiedades de autoignición similares a la gasolina facilitan la combustión en fase premezclada, produciendo menores niveles de humo y NO_x que el diésel convencional. Sin embargo, también generan mayores emisiones de CO y HC, así como altas tasas de liberación de calor. Estos inconvenientes pueden mitigarse mediante estrategias de gestión de la mezcla, diseño de inyectores y sistemas de inyección múltiple. Además, se sugiere que al utilizar gasolina pueden emplearse inyectores con orificios de mayor diámetro y presiones de inyección más bajas. No obstante, cuanto mayor es el octanaje, más problemático resulta el funcionamiento a baja carga y alta velocidad (Leif, 2010).

En un estudio posterior, Leif et al. (2009) compararon el funcionamiento de un motor monocilíndrico de encendido por compresión con cuatro combustibles de diferente índice de octano (RON 91, 84, 78 y 72). Concluyeron que, a altas cargas, los niveles de NO_x pueden reducirse mediante el incremento de la recirculación de gases de escape (EGR) para todas las gasolinas, manteniendo a su vez niveles de humo significativamente inferiores en comparación con el diésel. En las condiciones evaluadas, el rango óptimo de RON se situó entre 75 y 85 (Leif et al., 2009).

Finalmente, con el propósito de analizar el impacto del uso de mezclas gasolina-diésel en el rendimiento y las emisiones de un motor diésel, se propone variar el tiempo de inyección de combustible —adelantándolo o retrasándolo— para evaluar sus efectos en las variables de interés. Al modificar el tiempo de inyección, se obtiene un mayor o menor período de retraso, lo cual, como se ha evidenciado en investigaciones previas, puede contribuir a un funcionamiento más eficiente y ambientalmente sostenible del motor.

METODOLOGÍA

Con el propósito de analizar el impacto sobre las prestaciones y los niveles de humo de un motor diésel al emplear una mezcla de gasolina-diésel y, a su vez, modificar el tiempo de inyección de combustible, se instaló un motor diésel en un banco de pruebas. El tipo de investigación desarrollado es de carácter experimental, dado que permite identificar relaciones de causa y efecto en contextos reales, mediante la manipulación de variables y la aplicación de análisis estadísticos, en caso de ser necesario.

El banco motor cuenta con un freno hidráulico, cuya capacidad varía entre 70 hp a 10 000 rpm y 900 hp a 4000 rpm. Este sistema permite la evaluación tanto de motores diésel como de gasolina. Está compuesto por una base capaz de soportar motores de hasta 600 kg, además de una placa trasera adaptable a diferentes bloques de motor y tamaños de volante. El intercambiador de mezcla posibilita regular la temperatura del motor y mantener condiciones operativas estables, garantizando así mediciones consistentes y repetibles (Saenz, 2024).

Las especificaciones técnicas del motor se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones del motor Isuzu C223

TIPO DE MOTOR	4 tiempos / inyección indirecta
TIPO DE CÁMARA DE COMBUSTIÓN	Swirl
DESPLAZAMIENTO TOTAL DE LOS PISTONES	2238 cc
RELACIÓN DE COMPRESIÓN	21:1
INTERCOOLER Y EGR	No
BOMBA E INYECTOR	Rendimiento mecánico
ESTÁNDARES AMBIENTALES	Pre - Euro

Nota: Elaboración propia.

Adicionalmente, el sistema cuenta con una consola de comando y control, la cual integra todos los mandos del entorno del banco de pruebas, incluyendo el acelerador y la válvula de control del freno. Esta consola dispone de un monitor LED de 22" destinado a la operación del software de adquisición SMAC.

El SMAC es un sistema de adquisición de datos diseñado para bancos de prueba que incorpora tecnología de última generación. Su software, de uso intuitivo, ofrece múltiples herramientas para la visualización, registro y análisis de ensayos experimentales. El sistema está conformado por módulos independientes, lo que permite ampliar la cantidad de canales de adquisición de datos según las necesidades del usuario. La comunicación entre los módulos y el sistema central se

realiza mediante fibra óptica, lo cual evita interferencias derivadas del ruido eléctrico, un factor relevante en entornos de dinamometría.

El software de adquisición presenta en tiempo real las curvas de potencia generadas durante las pruebas, y permite visualizar los resultados a través de gráficos dinámicos, comparando simultáneamente todos los parámetros medidos y las diferentes pruebas realizadas. Además, facilita la elaboración de tablas comparativas e informes técnicos a partir de los datos experimentales obtenidos.

El banco de pruebas está equipado con una central barométrica, encargada de registrar las condiciones ambientales de la sala de ensayo, incluyendo la temperatura, la humedad y la presión atmosférica. Con base en estos valores, el sistema calcula y aplica automáticamente el factor de corrección de potencia en tiempo real.

Asimismo, el banco dispone de sensores de temperatura del agua, temperatura del aceite, temperatura de los gases de escape y presión de aceite, los cuales permiten un monitoreo continuo del comportamiento del motor durante los ensayos.

Para la medición de la densidad de humos, se empleó un opacímetro, mientras que el consumo de combustible fue determinado mediante una balanza gravimétrica. Adicionalmente, se utilizó una termocupla, instalada a la entrada de la bomba de combustible, para medir la temperatura del carburante.

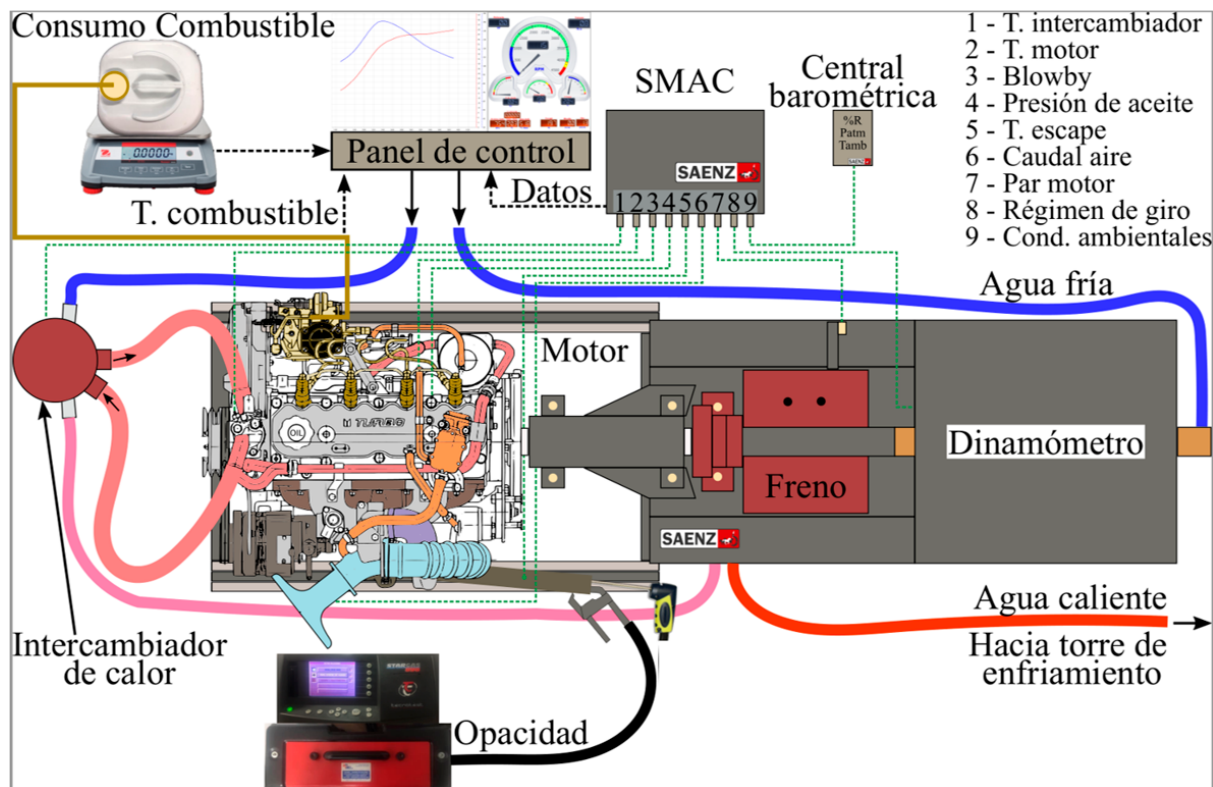
La Tabla 2 presenta la precisión de los equipos y sensores empleados en este estudio, y la Figura 2 muestra el esquema de la configuración experimental utilizada.

Tabla 2. Características de los equipos de medición utilizados en el lugar de trabajo

EQUIPO O SENSOR	VARIABLE	PRECISIÓN
Celda de carga (hasta 250 kg)	Par	0.1 Nm
Balanza gravimétrica (hasta 30 kg)	Masa de combustible	1 g
Medidor de humos	Densidad de humos [m^{-1}]	0.01 m^{-1}

Nota: Elaboración propia.

Figura 2. Configuración experimental



Nota: Elaboración propia.

Para este estudio se seleccionó una mezcla de gasolina-diésel, con el propósito de evaluar la influencia de dicha combinación en las prestaciones y en la cantidad de humos generados por un motor diésel. La concentración volumétrica de gasolina fue establecida en 10 %.

Las propiedades del combustible fueron determinadas con el fin de comprender su influencia tanto en el comportamiento operativo del motor como en los niveles de emisiones producidos. Las propiedades evaluadas fueron:

Densidad

La densidad del combustible se determinó experimentalmente siguiendo la norma ASTM D1298. Este método de ensayo permite establecer la densidad, la densidad relativa o la gravedad API del petróleo crudo, de los productos derivados del petróleo, o de las mezclas de productos derivados y no derivados del petróleo que se encuentren en estado líquido bajo condiciones normales de procesamiento. La medición se realiza mediante el uso de un hidrómetro (ASTM International, 2023).

Curvas de destilación

La destilación es un proceso de separación física basado en la diferencia de volatilidad de los distintos componentes presentes en una mezcla o solución. Su objetivo es separar los componentes de acuerdo con las diferencias en sus puntos de ebullición. La curva de destilación se obtiene registrando el volumen destilado en función de la temperatura.

Para determinar la curva de destilación tanto del combustible estándar como de la mezcla G10, se siguió la norma ASTM D86-12, utilizando un destilador eléctrico.

El índice de cetano (IC) representa una estimación teórica del número de cetano, parámetro que permite evaluar la calidad de ignición de un combustible diésel. Este índice se determina de manera indirecta, a partir de los datos de densidad y de la curva de destilación del combustible, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM D976.

La ecuación empleada para el cálculo del índice de cetano se expresa de la siguiente forma:

$$IC = 454.74 - 1641.416D + 774.74D^2 - 0.554B + 97.803 (\log B)^2$$

donde:

- D = densidad de la muestra a 15 °C (g/ml)
- B = temperatura de ebullición correspondiente al 50 % de la muestra destilada (°C)

El valor obtenido mediante esta correlación proporciona una estimación confiable del comportamiento de encendido del combustible en condiciones de operación típicas de motores diésel, y permite comparar distintos tipos de combustibles o mezclas alternativas sin requerir ensayos experimentales directos de número de cetano.

Teniendo en cuenta la ecuación anterior, se destaca que el número de cetano de un combustible para motores diésel constituye un indicador fundamental de sus características de ignición. En términos generales, un mayor número de cetano refleja una mejor capacidad de encendido del combustible, es decir, un menor retardo entre la inyección y el inicio de la combustión. Esta propiedad incide directamente en varios parámetros de desempeño del motor, tales como la calidad y eficiencia de la combustión, la estabilidad de funcionamiento, la manejabilidad del motor, así como en la formación de humo blanco, el nivel de ruido de combustión y las emisiones contaminantes, particularmente de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos no quemados (HC) (Bhatia, 2014).

Es importante señalar que el índice de cetano se utiliza comúnmente como parámetro representativo de las características de ignición de los combustibles diésel, dado que, como se mencionó anteriormente, puede obtenerse a partir de los datos de densidad y de la curva de destilación.

Poder calorífico

El poder calorífico superior (PCS) de un combustible se define como la máxima cantidad de calor que puede liberarse durante la combustión completa de una cantidad determinada de combustible, cuando los productos de dicha combustión se enfrían hasta la temperatura inicial de la mezcla de aire y combustible, y el agua formada se condensa.

El valor del poder calorífico depende principalmente de la cantidad de vapor de agua que se condensa durante el enfriamiento de los gases resultantes de la combustión. Esta magnitud se expresa por unidad de masa o por unidad de volumen del combustible oxidado.

El vapor de agua generado en la combustión proviene tanto de la reacción del hidrógeno presente en el combustible como de la humedad contenida en el propio combustible (Ingemecanica, 2019).

Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática se define como la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido. En este contexto, la viscosidad representa la resistencia que ofrece un fluido al deslizamiento de sus capas internas y depende tanto de la naturaleza del líquido como de la temperatura. Para el análisis de esta propiedad, se siguió la norma ASTM D446 (ASTM International, 2023).

Las propiedades de la mezcla compuesta por 10 % de gasolina y 90 % de diésel (G10) se presentan y comparan con las del diésel estándar (D) en la Tabla 3. Como se observa, la mezcla G10 presenta una menor densidad y viscosidad en comparación con el diésel estándar, pero un índice de cetano superior (5,68 %), lo cual tiende a reducir el tiempo de retraso de la ignición.

Tabla 3. Propiedades básicas del combustible

COMBUSTIBLE	DENSIDAD [KG/M3]	ÍNDICE DE CETANO [-]	PODER CALORÍFICO SUPERIOR [KJ/KG]	VISCOSIDAD A 40°C [SCT]
D	864	45,7	45745	3,836
G10	853	48,3	45410	2,820

Nota: Elaboración propia.

Para todas las condiciones de operación establecidas y para cada tipo de combustible o mezcla, el motor se operó a diferentes niveles de carga (100 %, 90 % y 80 %) y velocidades de giro (1500, 2000, 2500, 3000 y 3500 rpm). En total, el plan experimental abarcó 60 ensayos.

En el caso del diésel estándar (D) y de la mezcla gasolina/diésel (G10), inicialmente se mantuvo el mismo tiempo de inyección, es decir, la bomba mecánica se conservó en la misma posición de avance para todos los ensayos. Esta condición inicial se denomina G10N. Posteriormente, con el fin de evaluar la influencia de la variación del tiempo de inyección, se realizaron dos ajustes adicionales: un avance del tiempo de inyección (G10A) y un retraso del mismo (G10R).

El procedimiento consistió en arrancar el motor y dejarlo estabilizar hasta alcanzar su temperatura normal de funcionamiento (aproximadamente 80 °C). Luego, se incrementó gradualmente la velocidad del motor para cada tipo de combustible hasta alcanzar la carga máxima (acelerador a fondo). El freno hidráulico fue modulado para variar la velocidad del motor entre 1500 y 3500 rpm.

Para cada condición estabilizada, se adquirieron los datos de rendimiento y emisiones de humo. Posteriormente, se redujo la carga al 90 % y 80 %, repitiendo el proceso de adquisición de datos dentro del mismo rango de velocidad (1500–3500 rpm).

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del análisis sobre la influencia en el rendimiento y las emisiones de humo de un motor diésel al emplear una mezcla de gasolina y diésel, considerando, además, la modificación del tiempo de inyección mediante su avance y retraso.

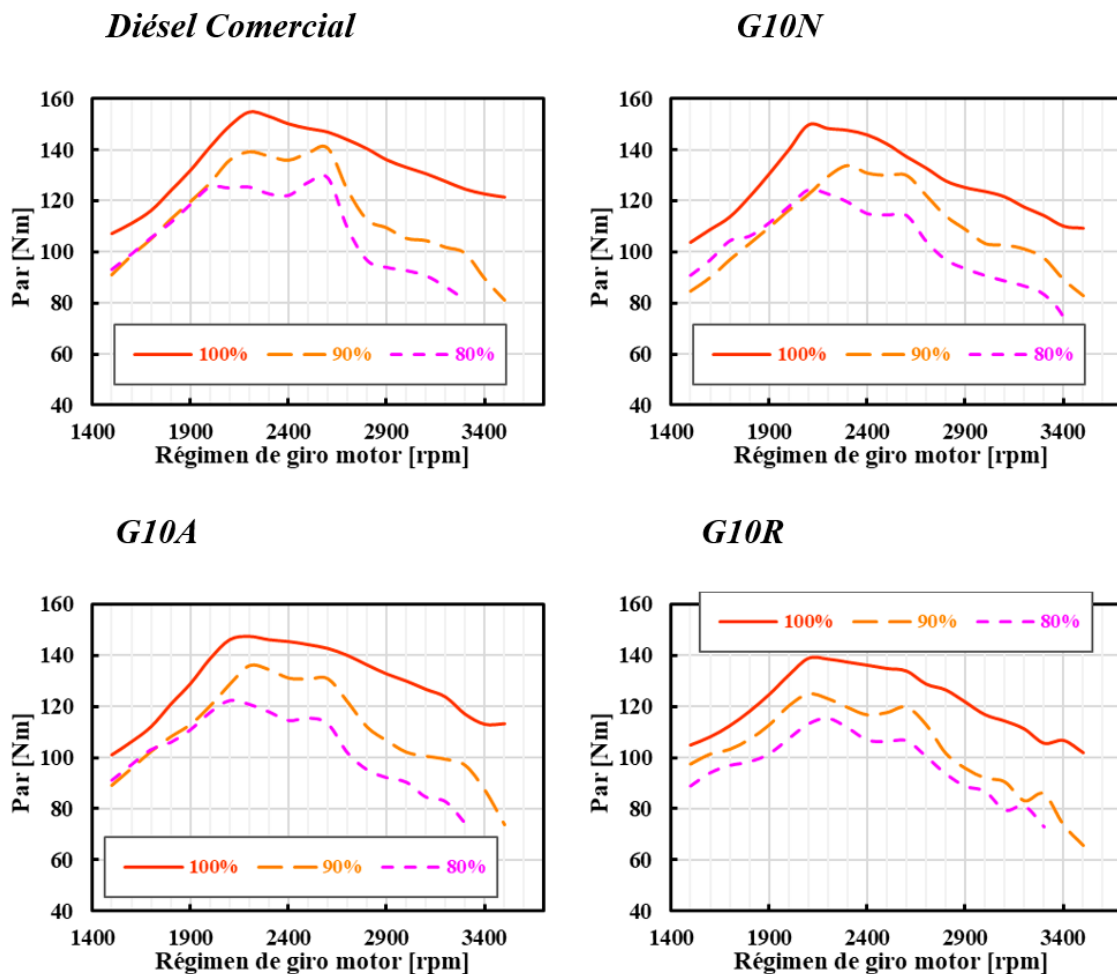
Como punto de partida, se evalúan los parámetros de potencia, par motor, rendimiento térmico y consumo específico de combustible (BSFC) para cada una de las condiciones de operación establecidas. Posteriormente, se analizan los resultados correspondientes a las emisiones de humo, las cuales fueron registradas simultáneamente con las mediciones de desempeño del motor.

Resultados de las prestaciones del motor

Como se observa en la Figura 3, al incrementar la velocidad del motor, el par aumenta progresivamente hasta alcanzar su valor máximo alrededor de 2200 rpm, para luego disminuir rápidamente conforme se aproxima a la velocidad máxima de operación (3500 rpm). A medida que disminuye la carga, el par también se reduce, comportamiento que se mantiene en todas las condiciones de operación y para todos los combustibles evaluados.

Cuando se adelanta el tiempo de inyección (mezcla G10A), es posible igualar los valores de par obtenidos con el combustible diésel convencional. En las condiciones de inyección normal (G10N), avanzada (G10A) y retrasada (G10R), el par promedio se reduce, para todos los niveles de carga, en aproximadamente 4,4 %, 3,7 % y 10 %, respectivamente, en comparación con el diésel estándar en el punto de máximo par (2200 rpm).

Figura 3. Resultados de Par para las diferentes condiciones de operación



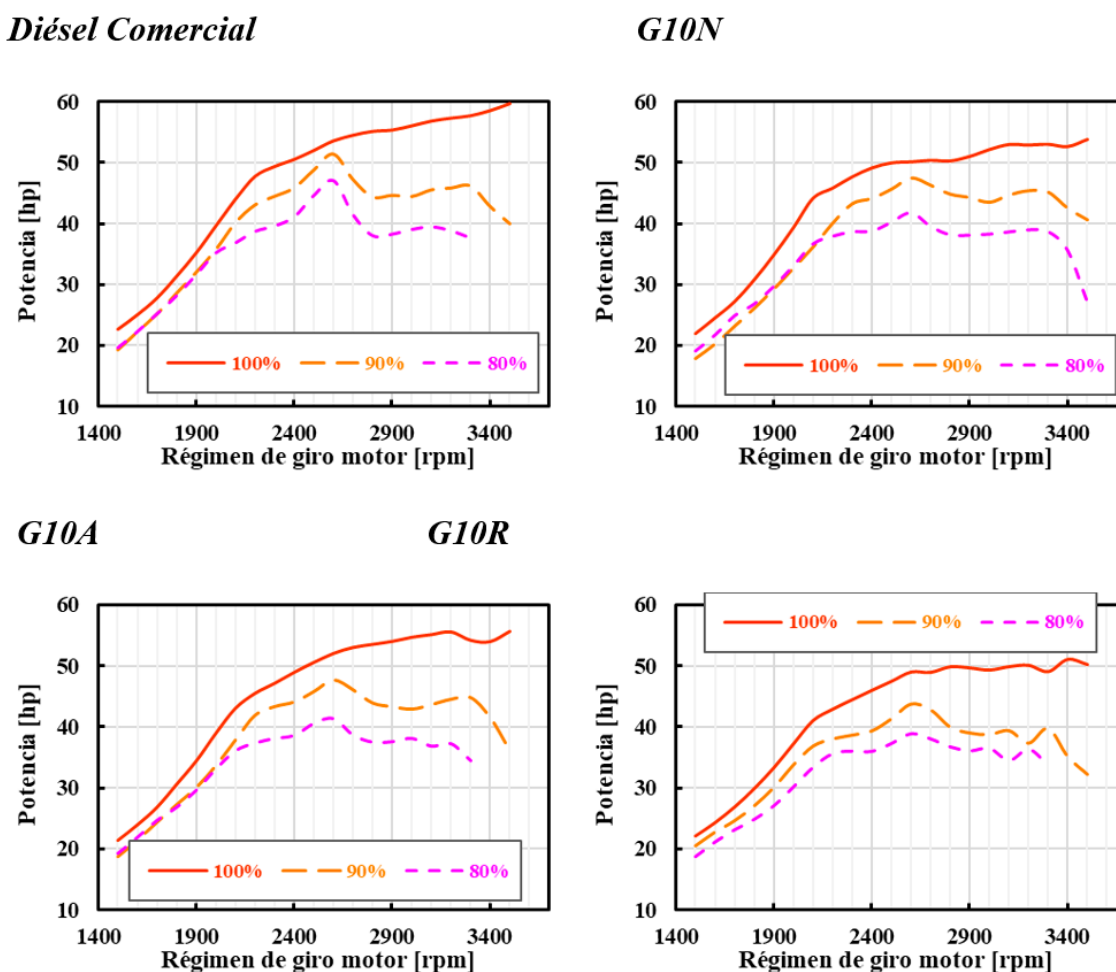
Nota: Elaboración propia.

En relación con la potencia del motor, el comportamiento observado es similar al del par. Se evidencian ligeras reducciones en los parámetros asociados al calor liberado por los combustibles, debido a que el poder calorífico de la mezcla gasolina/diésel es inferior al del diésel estándar, lo que podría generar una disminución en la cantidad total de energía liberada durante la combustión.

Cuando se adelanta el tiempo de inyección, los valores de potencia obtenidos son muy similares a los del combustible convencional. En cambio, al retrasar la inyección, la potencia puede disminuir hasta un 11,7 % para una carga del 90 % a 2200 rpm. En términos generales, para el grado de carga del 100 %, las condiciones G10N, G10A y G10R presentan reducciones de potencia de aproximadamente 5,1 %, 3,6 % y 9,0 %, respectivamente, en comparación con el diésel estándar; comportamiento que se mantiene de manera similar en los otros niveles de carga evaluados.

En síntesis, tanto el par como la potencia obtenidos bajo la condición G10A presentan los resultados más cercanos al desempeño del combustible diésel convencional, tal como se observa en la Figura 4.

Figura 4. Resultados de Potencia para las diferentes condiciones de operación



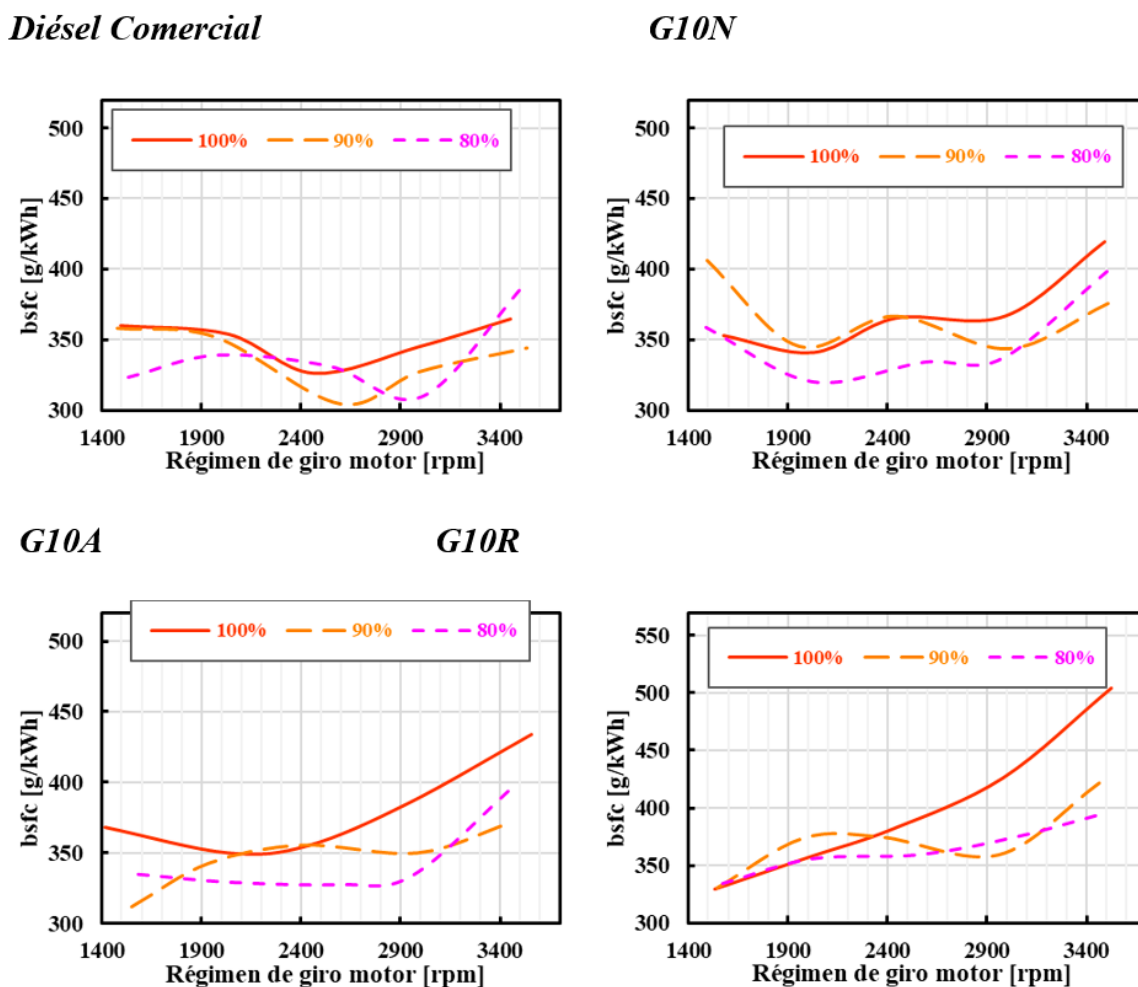
Nota: Elaboración propia.

En relación con el consumo específico de combustible (BSFC), para todas las condiciones de operación y tipos de combustible se observa que este tiende a disminuir a medida que se reduce el grado de carga, como se muestra en la

Figura 5. Al emplear la mezcla gasolina/diésel (G10), en todos los casos el consumo fue mayor en comparación con el diésel estándar. Este comportamiento se explica por el menor poder calorífico de la mezcla G10, lo que implica la necesidad de inyectar una mayor cantidad de combustible para mantener una potencia equivalente.

En comparación con el diésel comercial, la máxima variación del incremento del consumo específico a 2000 rpm alcanza un 6,2 % bajo la condición de retraso (G10R). Asimismo, al modificar el tiempo de inyección, se evidencia un aumento del consumo máximo de aproximadamente 5,6 %, 8,2 % y 14,3 % para las condiciones G10N, G10A y G10R, respectivamente, en el grado de carga del 100 %, en comparación con el diésel convencional. Para los demás niveles de carga, el comportamiento es similar, siendo más evidente el incremento del consumo a mayores regímenes de giro (rpm).

Figura 5. Resultados de Consumo específico de combustible para las diferentes condiciones de operación



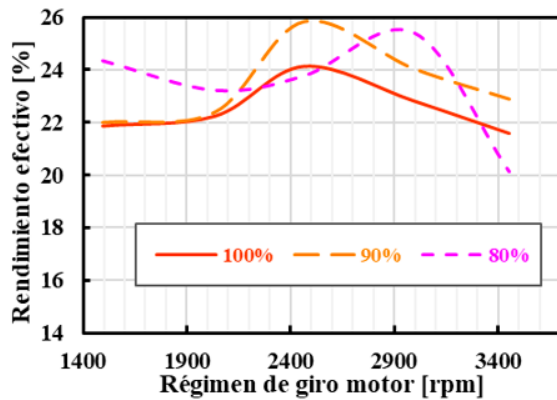
Nota: Elaboración propia.

En relación con el rendimiento térmico, el cual es inversamente proporcional al consumo específico de combustible (BSFC), en la Figura 6 se observan pequeñas variaciones de esta propiedad para ambos combustibles y todos los niveles de carga. En general, el rendimiento térmico tiende a aumentar a medida que disminuye la carga, lo que indica un aprovechamiento más eficiente de la energía del combustible en dichas condiciones. Los resultados muestran una eficiencia térmica similar, independientemente del tipo de combustible o del nivel de carga aplicado. No obstante, al modificar el tiempo de inyección,

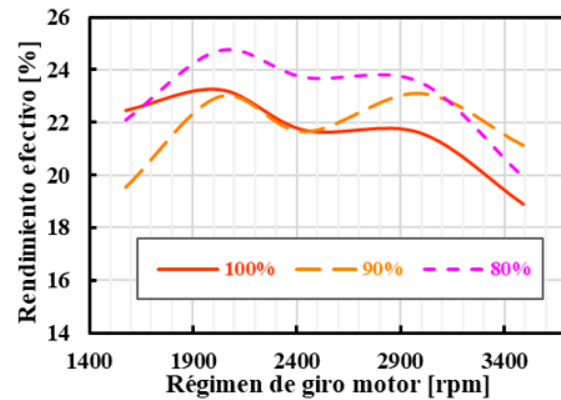
tanto al avanzarlo como al retrasarlo, se observa una ligera reducción del rendimiento térmico, siendo más pronunciadas las diferencias en el rango de 3000 a 3500 rpm.

Figura 6. Resultados de Rendimiento térmico para las diferentes condiciones de operación

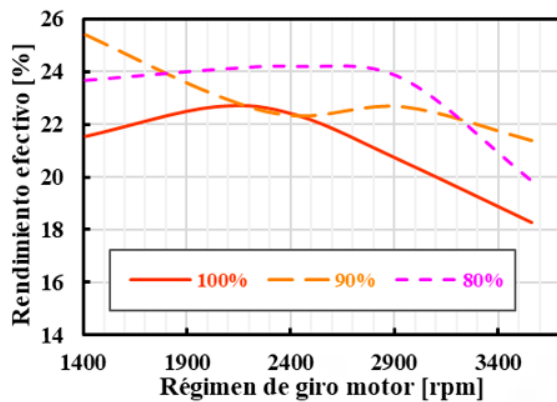
Diésel Comercial



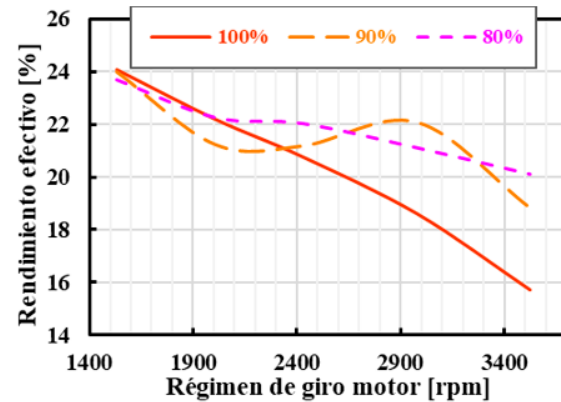
G10N



G10A



G10R



Nota: Elaboración propia.

Resultados de los niveles de densidad de humos

Los resultados de las emisiones de densidad de humo se presentan en la Figura 7. Independientemente del nivel de carga, los valores máximos de este contaminante se registran a bajas revoluciones del motor. Al comparar la Figura 5 con la Figura 8, se observa que los niveles más bajos de potencia coinciden con las velocidades más reducidas del motor, lo que puede interpretarse como un incremento en la relación combustible/aire (dosado). Por otro lado, a medida que disminuye la carga operativa del motor, también se reducen los niveles de densidad del humo.

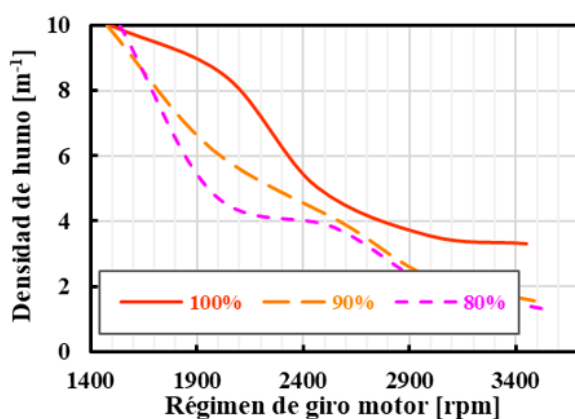
Se evidencia una disminución en los niveles de densidad del humo al utilizar la mezcla de gasolina y diésel (G10) en los tres casos analizados, en comparación con el combustible diésel convencional. Las menores emisiones de humo con la mezcla G10 se obtienen cuando se retrasa el tiempo de inyección del combustible. Esta reducción puede atribuirse a una mejor oxidación que ocurre en las zonas ricas en combustible dentro de la cámara de combustión (Venu, 2019). Además,

las mezclas diésel-gasolina tienden a prolongar el retraso del encendido y a retardar las fases de combustión, lo que contribuye adicionalmente a disminuir la formación de humo (Song & Lia, 2019).

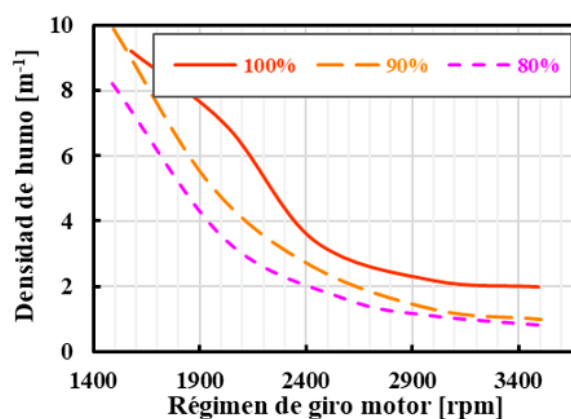
En condiciones de alta velocidad del motor (entre 3000 y 3500 rpm) y para todas las cargas y tiempos de inyección, se logra la mayor reducción en la densidad del humo. Asimismo, al disminuir la carga, se observa una reducción adicional en las emisiones. En promedio, la reducción máxima de los niveles de densidad de humo con respecto al diésel estándar es del 17,4 % para la condición G10N, del 22,1 % para G10A y del 51,0 % para G10R, observándose las mayores disminuciones en el rango de 3000 a 3500 rpm.

Figura 7. Resultados de Densidad de humos para las diferentes condiciones de operación

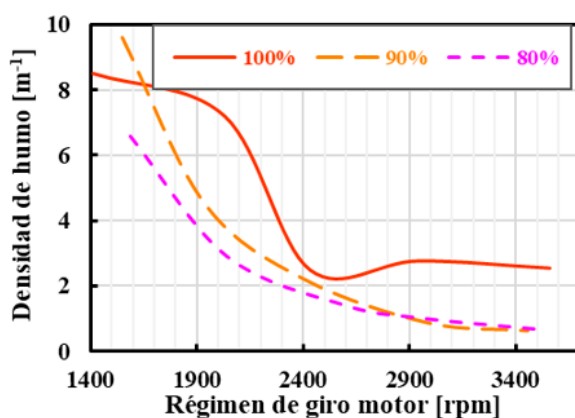
Diésel Comercial



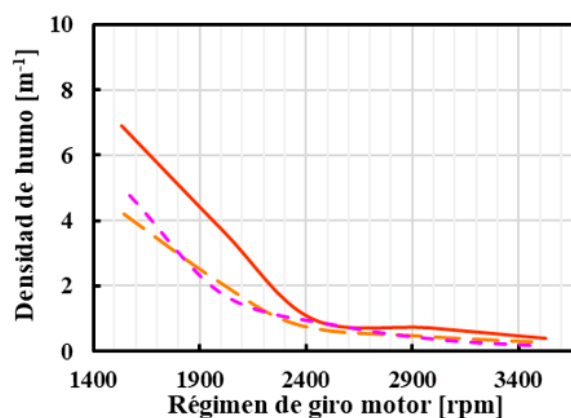
G10N



G10A



G10R



Nota: Elaboración propia.

Comparación de mejores resultados

Con el propósito de resaltar el potencial futuro del empleo de mezclas de gasolina y diésel, se realizó una revisión detallada de los resultados experimentales, identificándose un punto de operación que podría sustituir la condición del combustible convencional. Para la condición de 1500 rpm y un grado de carga del 90 %, con inyección retrasada, es posible mejorar las

prestaciones del motor —en términos de par y potencia—, al tiempo que se reduce el consumo específico de combustible y la densidad de humos, como se muestra en la Tabla 4.

En esta condición, el par y la potencia presentan incrementos del 6,57 % y 6,92 %, respectivamente. En cuanto al consumo específico de combustible, se observa una disminución del 7,63 %. Finalmente, respecto a las emisiones contaminantes, la densidad de humos se reduce en un 57,95 %, lo que evidencia el potencial técnico y ambiental de la mezcla G10 con inyección retrasada como una alternativa viable al diésel convencional.

Tabla 4. Comparación de los resultados obtenidos con Diésel convencional y condición G10R.

COMBUSTIBLE	POTENCIA [NM]	POTENCIA [HP]	CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE [G/KWH]	DENSIDAD DE HUMOS [M ⁻¹]
D	91,2	19,21	357,96	9,99
G10R	97,5	20,54	330,64	4,20

Nota: Elaboración propia.

Lo anterior confirma que el empleo de mezclas de gasolina y diésel, junto con la modificación del tiempo de inyección, constituye una alternativa técnica viable para mantener las prestaciones de los motores diésel y, de manera adicional, lograr una reducción significativa en los niveles de densidad de humos.

CONCLUSIONES

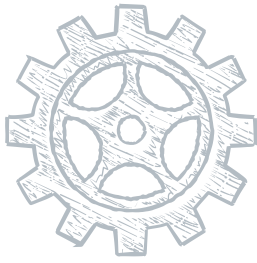
La gasolina presenta un poder calorífico inferior al del diésel comercial, característica que incide directamente en la potencia entregada por el motor y/o en el consumo de combustible, generando un aumento en el consumo específico de combustible. Para las mezclas G10, la disminución del poder calorífico fue del 0,73 % con respecto al diésel estándar.

El índice de cetano de la mezcla de gasolina y diésel (G10) es 5,7 % mayor en comparación con el combustible convencional, lo que puede ejercer un efecto positivo sobre el inicio del proceso de combustión, al reducir el tiempo de retraso de encendido.

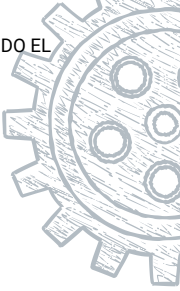
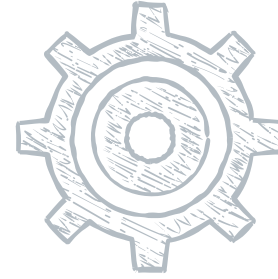
El par y la potencia obtenidos para las condiciones G10N, G10A y G10R son muy similares a los del diésel comercial, sin presentarse reducciones significativas en las prestaciones. Para cada caso, la máxima disminución registrada fue del 4,4 %, 3,7 % y 10 %, respectivamente, en el punto de máximo par (2200 rpm). El consumo específico de combustible es el parámetro que se ve más afectado, debido al menor poder calorífico de la mezcla G10.

En general, se observa que el combustible con mayores beneficios en términos de rendimiento corresponde a la mezcla con 10 % de gasolina en la condición de avance de inyección (G10A), ya que presenta reducciones mínimas en los niveles de par y potencia respecto al combustible convencional, con un ligero incremento en el consumo.

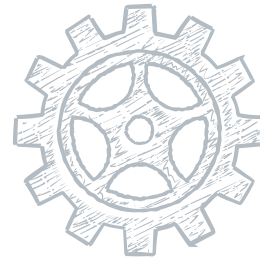
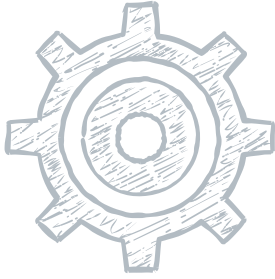
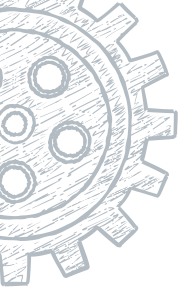
La reducción de los niveles de densidad de humos es más significativa cuando se retrasa el tiempo de inyección de combustible (condición G10R), aunque en algunos puntos se evidencian pérdidas mayores en las prestaciones. El principal factor que contribuye a esta reducción es la mejor oxidación que ocurre en las zonas ricas de combustible dentro de la cámara de combustión.



REFERENCIAS

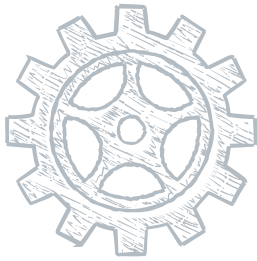


- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2024, julio). ATSDR en español. https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html
- Aguirre, P. (2023). La responsabilidad civil en la inteligencia artificial [Trabajo de fin de máster, Universidad de Alcalá]. https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/58008/TFM_Aguirre_Rodriguez_2023.pdf
- Air Central Texas. (2024, julio). La contaminación por partículas. <https://aircentraltexas.org/es/calidad-del-aire/la-contaminaci%C3%B3n-por-part%C3%ADculas>
- Alessandri Rodríguez, A. (1987). De la responsabilidad extracontractual en el derecho civil. Imprenta Universal.
- Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (AECC). (2024, julio). AECC. <https://www.aecc.eu/>
- ASTM International. (2023). Standard test method for density, relative density, or API gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method. ASTM International.
- Autonocion. (2024, junio). El catalizador: qué es, partes, componentes y funcionamiento. <https://www.autonocion.com/el-catalizador-que-es-partes-componentes-y-funcionamiento/>
- Ayuso, S. (2018, 29 de marzo). Macron quiere poner a Francia en la cabeza de la inteligencia artificial. El País. https://elpais.com/internacional/2018/03/29/actualidad/1522339582_294339.html
- Barrios, E. (2003). La certeza del daño en la responsabilidad civil. Editorial Jurídica.
- Bloomberg. (2018). Inteligencia artificial de Google causa asombro y preocupación. Portafolio.co.
- Briones, G. (2007). La formulación de problemas de investigación social. Trillas.
- Cámara Colombiana de Comercio Electrónico. (2022). Inteligencia artificial y big data: Aliados clave del comercio electrónico. <https://www.ccce.org.co/noticias/inteligencia-artificial-y-big-data-ecommerce/>
- Congreso de la República. (s. f.). Proyecto de Ley 091 de 2023.
- Consulta Parlamento Europeo. (2017). Consulta del Parlamento Europeo entre el 8 de febrero y el 1 de junio de 2017. <https://www.europarl.europa.eu/cmsdata/130980/comision-asuntos-juridicos-resumen-consulta-robotica.pdf>

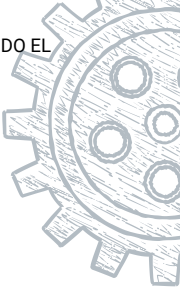
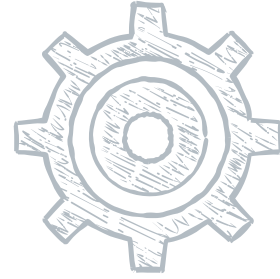


REFERENCIAS

- Corte Constitucional. (2020). Sentencia C-378/20. <https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2020/C-378-20.htm>
- Corte Constitucional de Colombia. (2024). Sentencia T-323.
- De Paz, G. (2018). Los robots y la responsabilidad civil extracontractual. Derecho de los Robots.
- Díaz, S. (2018). Robots y responsabilidad civil.
- Díez-Picazo, L. (1996). Fundamentos del derecho civil patrimonial. Tecnos.
- Directiva del Consejo de la Unión Europea. (1985). Directiva 85/374/CEE del Consejo, de 25 de julio de 1985, sobre responsabilidad por los daños causados por productos defectuosos. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b21bef4e-b528-49e2-a0f9-142dc503969a/language-es>
- Ebers, M. (2016). La utilización de agentes electrónicos inteligentes en el tráfico jurídico.
- El Economista. (2010). Las causas del flash crash al descubierto: La SEC publica su informe oficial.
- Executive Office of the President, National Science and Technology Council, Committee on Technology. (2016). Preparing for the future of artificial intelligence.
- García, J. (2018). Aproximación a una personalidad jurídica específica.
- Gobierno de Japón. (2017). Basic strategy for the promotion of the AI society. <https://www.meti.go.jp/search/result.html?q=%E4%BA%BA%E5%B7%A5%E7%9F%A5%E8%83%BD>
- Guerrero Dávila, G. (2015). Metodología de la investigación.
- Hernández, M. (2019). Inteligencia artificial y derecho penal. Actualidad Jurídica Iberoamericana.
- Herrera de las Heras, R. (2022). Aspectos legales de la inteligencia artificial: Personalidad jurídica de los robots, protección de datos y responsabilidad civil. Dykinson.
- Iglesias, A. (2023, 30 de noviembre). Se cumple un año del lanzamiento de ChatGPT: Así ha cambiado nuestras vidas

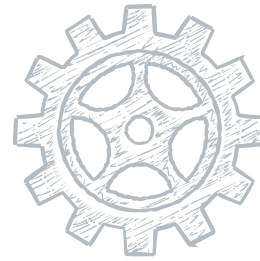
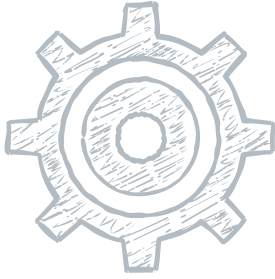
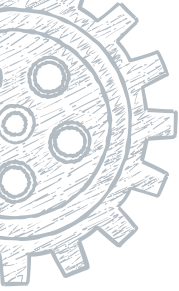


REFERENCIAS



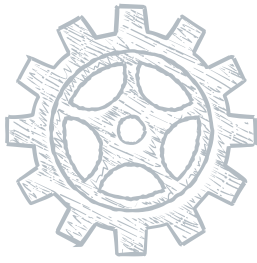
esta inteligencia artificial. El Español. https://www.elespanol.com/invertia/disruptores-innovadores/innovadores/tecnologicas/20231130/cumple-ano-lanzamiento-chatgpt-cambiado-vidas-inteligencia-artificial/813418664_0.html

- KioTech. (2023). Cómo Singapur está usando la inteligencia artificial. <https://www.kio.tech/blog/como-singapur-est%C3%A1-usando-a-la-inteligencia-artificial>
- Kroet, C., & Sanchez, A. (2024). Política de la UE: El Parlamento Europeo aprueba la Ley de IA por abrumadora mayoría. Euronews.
- Lean, P. (2019). The extension of legal personhood in artificial intelligence. *Revista de Bioética y Derecho*, (46).
- Ley 84 de 1873. (s. f.). Código Civil Colombiano. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/codigo_civil.html
- Marmolejo, O. (2023). Inteligencia artificial y responsabilidad civil: Una aproximación teórica de lo que alguna vez fue ciencia ficción [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana]. <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/11289/Inteligencia%20artificial%20y%20responsabilidad%20civil.pdf>
- McCarthy, J. (1956). Conferencia de Dartmouth.
- Méndez, C., Marín, A., Cruz, A., & Rosero, C. (2019). El paradigma hermenéutico: Una propuesta para el reconocimiento del “otro” en las comunidades indígenas del Ecuador.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2024, febrero). Hoja de ruta para el desarrollo y aplicación de la inteligencia artificial. https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/noticias/hoja_de_ruta_adopcion_etica_y_sostenible_de_inteligencia_artificial_colombia_0.pdf
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC). (2019). Política nacional para la transformación digital e inteligencia artificial.
- Navarro, M. (2023). Daños e inteligencia artificial: Aspectos éticos y jurídicos. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/84206>
- Navejans, A., & Sharkey, N. (2018). Europa divided over robot “personhood.” *Politico*.

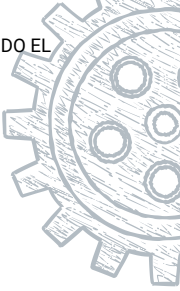
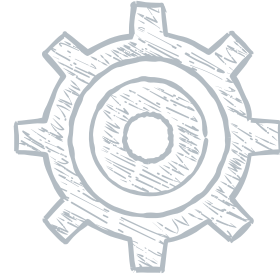


REFERENCIAS

- New Zealand Law Foundation. (2019). Government use of artificial intelligence in New Zealand. https://www.otago.ac.nz/_data/assets/pdf_file/0027/312588/https-wwwotagoacnz-caipp-otago711816pdf-711816.pdf
- Palmerini, E. (2014). The RoboLaw Project.
- Parlamento Europeo. (1985). Directiva del Consejo del 25 de julio de 1985.
- Parlamento Europeo. (2017). Informe con recomendaciones destinadas a la Comisión sobre normas de derecho civil sobre robótica.
- Parlamento Europeo. (2020). [Documento sin título].
- Parlamento Europeo. (2024). Ley de IA de la UE: Primera normativa sobre inteligencia artificial. https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2023/6/story/20230601STO93804/20230601STO93804_es.pdf
- Pierre Voirin. (1984). Manual de droit civil. Librairie Générale de Droit et de Jurisprudence.
- R. S., & Peter, N. (2020). Artificial intelligence: A modern. Pearson.
- Ramón Meza Barros. (1963). Manual de derecho civil: De las obligaciones. Editorial Jurídica de Chile.
- Real Academia Española. (2022). Diccionario de la lengua española (23.ª ed.). Entrada "Inteligencia artificial". <https://dle.rae.es/inteligencia%20artificial>
- Revista Semana. (2024). Alerta en la comunidad científica: Inteligencia artificial se reprogramó para eludir control humano. Semana.
- Ricoy, C. (2006). Contribución sobre los paradigmas de investigación.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (1995). Inteligencia artificial: Un enfoque moderno.
- Santos Ballesteros, J. (2014). El daño moral en la responsabilidad civil. TEMIS.
- Superintendencia de Industria y Comercio. (2012). Sobre el régimen general de protección de datos personales. <https://www.sic.gov.co/informacion-sobre-la-proteccion-de-datos-personales>



REFERENCIAS



- Tamayo Jaramillo, J. (2011). Tratado de responsabilidad civil. TEMIS.
- Tamayo Lombana, A. (1998). Manual de obligaciones: La responsabilidad civil fuente de las obligaciones. TEMIS.
- UNESCO. (2022). ¿Qué estudia la inteligencia artificial? https://es.unesco.org/sites/default/files/ia_triptico_l3_web_0.pdf
- Unión Europea. (2012). Regulating emerging robotic technologies in Europe: Robotics facing law and ethics. <https://cordis.europa.eu/article/id/92136-the-laws-and-ethics-of-robotics/es>
- Vidal Olivares, Á. (2007). Responsabilidad civil extracontractual. Editorial Jurídica de Chile.
- Walter Brugger. (1958). Diccionario de filosofía. Gerler.
- Wegmann, A. (2018). Sobre la noción de contrato en las instituciones de Gayo. Revista de Derecho Privado.
- Zurita, M. (2020). La responsabilidad civil por los daños causados por los robots inteligentes como productos defectuosos. Reus