

Análisis de inyectores usando combustibles alternativos en motor.

Analysis of injectors using alternative fuels In the engine.

Héctor Hugo Riojas-González¹, Liborio Jesús Bortoni-Anzures², Juan Julián Martínez-Torres³

^{1,2,3}*Universidad Politécnica de Victoria, Tamaulipas - México*

ORCID: ¹[0000-0003-2401-1110](https://orcid.org/0000-0003-2401-1110), ²[0000-0003-2025-4369](https://orcid.org/0000-0003-2025-4369), ³[0009-0007-3859-8684](https://orcid.org/0009-0007-3859-8684)

Recibido: 18 de enero de 2024.

Aceptado: 15 de marzo de 2024.

Publicado: 1 de mayo de 2024.

Resumen- La inyección del combustible es muy importante para la distribución y la mezcla aire-combustible dentro de la cámara de combustión para el rendimiento general del motor. El desarrollo tecnológico influye en gran medida para que se pueda inyectar el combustible directamente a gran presión, a través de uno o varios inyectores con un grado de penetración variado y en función del ángulo del inyector, todo esto para lograr reducir tanto el consumo de combustible como las emisiones, logrando mayor eficiencia y además adecuarlo para el uso de los biocombustibles. Este artículo se basa en una metodología de investigación científica a través de una revisión exhaustiva bibliográfica. La finalidad de esta investigación consiste en la necesidad de resaltar la necesidad del avance tecnológico en cuanto a inyectores se refiere para que estos puedan ser aplicados en combustibles alternativos como los biocombustibles. Entre los resultados más destacables consideramos que algunas estrategias de inyección pueden ser muy recomendables para aplicarlos en los biocombustibles, tal es el caso de la doble inyección, el tiempo de inyección avanzada del combustible piloto y alta presión de inyección junto con una sincronización avanzada. La estrategia de la inyección dividida puede ser una solución al igual que la inyección de tiempo retardado, ayudan a mejorar las condiciones del motor, adaptándose a las características de los combustibles alternativos. Se concluye que el desarrollo tecnológico en los inyectores es crucial para el uso futuro de los combustibles alternativos.

Palabras clave: inyección, cámara de combustión, biodiesel, alcohol.

Abstract— Fuel injection is very important for air-fuel distribution and mixing within the combustion chamber for overall engine performance. Technological development has a major influence on the fuel being injected directly at high pressure through one or more injectors with a varying degree of penetration and depending on the angle of the injector, all this to achieve reduce both fuel consumption and emissions, achieving greater efficiency and also adapt it to the use of biofuels. This article is based on a scientific research methodology through an exhaustive bibliographic review. The purpose of this research is to highlight the need for technological advancement in terms of injectors so that they can be applied in alternative fuels such as biofuels. Among the most noteworthy results we consider that some injection strategies can be highly recommended to apply them in biofuels, such as double injection, Advanced pilot fuel injection time and high injection pressure along with advanced timing. The strategy of split injection can be a solution just like delayed time injection, help improve engine conditions, adapting to the characteristics of alternative fuels. It is concluded that technological development in injectors is crucial for the future use of alternative fuels.

Keywords: injection, combustion chamber, biodiesel, alcohol.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: hriojasg@upv.edu.mx (Héctor Hugo Riojas González).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Como citar este artículo: H. H. Riojas-González, L. J. Bortoni-Anzures y J. J. Martínez-Torres, "Análisis de inyectores usando combustibles alternativos en motor", *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, vol. 12, no. 2, pp. 249-258 2024, doi: [10.15649/2346030X.3734](https://doi.org/10.15649/2346030X.3734)

I. INTRODUCCIÓN

Después de la era del carburador, los sistemas de inyección del combustible se convirtieron en la tecnología primaria para entregar el combustible a la cámara de combustión. En esta tecnología, la atomización del combustible consiste en introducir al combustible con la ayuda del bombeo de alta presión, a través de una boquilla estrecha [1]. Puede haber complicaciones en el uso de biocombustibles, puesto que, puede reducir la eficiencia térmica de los frenos, tal es el caso del biodiésel, que ocasiona una mala pulverización en la cámara de combustión, debido a su mayor viscosidad, insuficiente mezcla de combustible, menor poder calorífico y mayor volatilidad [2]. Esto no solo sucede con los biocombustibles líquidos, también ocurre con los biocombustibles gaseosos, tal es el caso del syngas (gas de síntesis) y la presencia del alquitrán en la cámara de combustión, el cual puede ocasionar severos daños, como, por ejemplo, bloquear los orificios de la boquilla de la inyección, debido a que estos son demasiado pequeños y por lo tanto, afectan al motor [3]. Otros factores que pueden causar daños severos a los motores, es el fenómeno del golpe, presente en algunos combustibles alternativos (por ejemplo, el hidrógeno), generando daños en el pistón, válvulas y culata, es actualmente aceptado que la detonación, se debe al autoencendido de la región de la cámara de combustión [4]. De acuerdo con McCormick et al. [5], mencionan que la estructura molecular del biocombustible tiene una relación directa con las emisiones. Todo esto nos hace señalar que, para poder introducir nuevos combustibles, se necesitarán incorporar nuevas restricciones y consideraciones en el diseño del motor, para de esta manera aprovechar al máximo el potencial de estos biocombustibles [6]. Por lo que estos motores deben ser rediseñados considerando el suministro del combustible de la cámara de combustión y por supuesto el tipo y diseño de la inyección [7]. El objetivo de este trabajo es analizar las alternativas que pueden ser utilizados en la inyección de combustibles alternativos, entendiendo que el sistema de inyección juega un papel muy importante en el desempeño del motor y en la reducción de emisiones. Los motores que se usan en la actualidad no están diseñados para aplicar los combustibles alternativos, por lo que generan desafíos entre los que destaca el sistema de inyección del combustible, en donde su diseño y desarrollo tecnológico resulta vital, esto es porque la inyección influye en la vaporización del combustible, distribución y mezcla dentro de la cámara de combustión, todo esto es responsable del rendimiento general del motor. Un tipo de combustible puede ser apto a un tamaño y orificio de boquilla de un inyector, pero para otro tipo de combustible, por su viscosidad (como el biodiésel), puede no ser apto. Existe otras variables a considerar en los inyectores como el número de orificios y su diámetro, lo cual influye en el tamaño de la gota que pueda mezclar en el combustible.

II. METODOLOGÍA

La metodología de investigación científica de este análisis está basada en un proceso sistemático de búsqueda con un enfoque mixto: cualitativo - cuantitativo, organizativo, y con un análisis de la documentación, en cuanto a lo que se ha publicado con la temática de este estudio. Se enmarca como un tipo de investigación analítica, utilizando estrategia y herramientas de análisis documental. Los criterios de este estudio que especifican las características metodológicas de la población, se denominan criterios de elegibilidad o de selección. Estos criterios son los de inclusión, exclusión y eliminación, que delimitan la población elegible. También se consideró la homogeneidad, que se refiere a que todos los miembros de la población tienen las mismas características, según las variables a estudiar. Estas variables se obtuvieron, mediante un recuento de documentos recuperados, considerando: su producción diacrónica (por años), producción institucional (por universidades o centros de investigación), colaboración internacional (países e instituciones extranjeras), revistas editoras, citación general (citas recibidas), patrón longitudinal de citas (por años) y artículos más citados. Para el procedimiento del análisis bibliométrico de esta metodología, se tomó en cuenta las dimensiones de la producción científica, el impacto, la colaboración y la evaluación. Se utilizó para el análisis bibliométrico los artículos científicos de la base de datos SCOPUS y Science direct. Para el procesamiento y visualización de los datos, se utilizaron los programas Ucinet y Bibexcel, respectivamente. La finalidad de esta investigación es exponer las opciones y alternativas que se pueden aplicar en los motores desde el punto de vista de los inyectores.

III. RESULTADOS ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

a. Interacción de combustión entre inyección y cámara de combustión

La inyección de combustible es un parámetro que afecta la vaporización, la distribución y la mezcla del combustible dentro de la cámara de combustión, que a su vez es responsable del rendimiento general del motor [8]. Al agregarse el sistema de inyección en el cuerpo del acelerador, esto más tarde fue modificado por el sistema de inyección de puerto, donde cada cilindro está equipado de inyectores que rocían combustible cerca de la válvula de entrada [1]. Aunque la inyección de multipunto (Figura 1) y de puerto son mucho mejor tecnología que la del carburador, todavía se necesita mejorar la mezcla del combustible con el aire, antes de que entre a la cámara de combustión. El tamaño adecuado de las gotas, la distribución del combustible y su penetración, conducen a una combustión más eficiente y por tanto una reducción de emisiones [9].

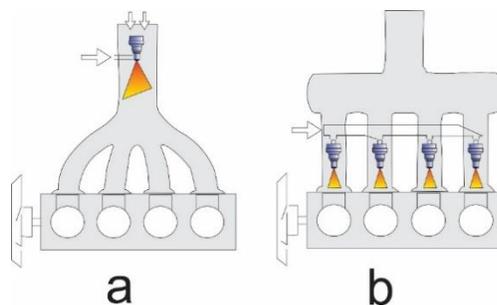


Figura 1: Tipo de inyecciones: a) monopunto y b) multipunto.
Fuente: Elaboración propia.

La tecnología DI entrega al combustible una alta presión que inyecta directamente en el cilindro a través de inyectores, el combustible se atomiza en el cilindro, con un grado de penetración en función del ángulo del inyector. Esta tecnología es de bajo consumo de combustible, lo

que permite un sistema de control que pone al motor de un siglo de antigüedad en uno de los mejores comparándolo con los vehículos híbridos o eléctricos [10]. En la Tabla 1 se muestran algunas modificaciones que se le hacen al motor en cuanto a la inyección. La presión de inyección es otro de los parámetros más significativos que influyen en la atomización del combustible, y por tanto en la formación de la mezcla, por lo que, es importante controlar la presión de inyección de combustible más adecuada para los motores diésel [11]. Si bien la presión más alta de inyección de un motor diésel es de 205 bar, cuando los motores CI se equipan con la Tecnología Common Rail Direct Injection (CRDI) (Figura 2), podría lograr presiones de inyección de hasta 2000 bar, con esto se puede regular el control de la presión en el riel del combustible [12].

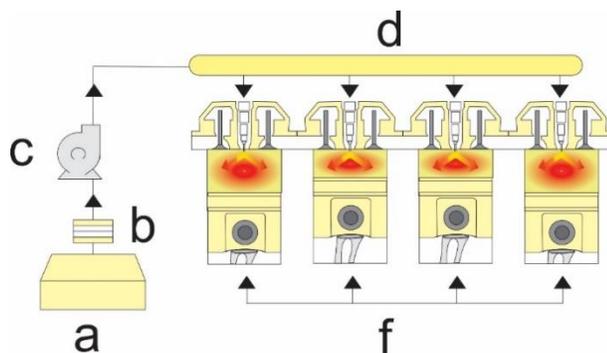


Figura 2: CRDI a) depósito de combustible, b) filtro de combustible, c) bomba de alta presión, d) riel de combustible, f) cilindros. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1: Modificación de motores en cuanto a la estrategia de inyección.

Tipo de estrategia de inyección	Desempeño del motor	Referencia
Retrasar el tiempo de inyección del piloto a baja y alta carga del motor	Mejorar en el rendimiento del motor y su consumo de energía específico del freno, con una reducción de emisiones del humo, pero con un incremento de NOx	[13]
Doble inyección, uno para el hidrógeno y otro para diésel	Se observó un mayor BTE en un motor modificado diésel Common rail	[14]
Aplicar inyectores multipunto en un motor FSI	Se implementa de esta forma una alta presión de admisión, esto permite una mezcla más homogénea con el aire durante la compresión	[15]
Inyección semi-directa	Para motor de motocicleta este tipo de inyección, puede reducir las emisiones y el consumo de combustible	[16]
Tiempo de inyección avanzada del combustible piloto	Se mostraron resultados óptimos en términos de rendimiento y reducción de emisiones como CO y HC	[17]
Alta presión de inyección de diésel con una sincronización avanzada de inyección de diésel	En combustión dual primero disminuye, y luego comienza a aumentar la presión de inyección, las emisiones de humo se reducen	[18]
El avance de la sincronización de la inyección junto con una mayor presión de inyección	Aumenta la presión máxima del cilindro, logrando una mejor mezcla de combustible, dando como resultado una presión más alta	[19]
Inyección con agua	Es muy efectiva para reducir el NOx, pero su aplicación depende de la forma eficiente de suministrar el líquido	[20]

Fuente: Elaboración propia.

b. Orificios en el inyector (boquillas)

El diseño de la boquilla del inyector de combustible es importante, para reducir las emisiones y mejorar el rendimiento del motor CI. Los parámetros a considerar son el número y tamaño de los agujeros, los cuales pueden variar en cuanto al diseño de la boquilla, para de esta manera mejorar las condiciones de la mezcla [21]. El tamaño y el orificio de la boquilla (Figura 3), puede ser apto para algunos combustibles, pero no para todos, tal es el caso del biodiésel que, por su mayor viscosidad, puede no ser adecuado para algunas de las boquillas [22]. Existen algunas variables como el número de orificios y el diámetro los cuales afectan directamente el tamaño de la gota, que tienen como finalidad el mezclarse más fácilmente con el combustible [21]. De acuerdo con el modelado numérico de Li et al. [23], informaron que los parámetros principales de la inyección del combustible es el flujo, la boquilla sónica, la relación de expansión de presión y la geometría de la boquilla. La aplicación de la salida en la boquilla es muy importante, ya que controla la mezcla de chorro, que pasa por debajo de la boquilla. En la Tabla 2 se muestran algunos tipos de boquillas del inyector de combustible. Algunos motores modernos usan micro-orificios (varios orificios) que influyen en el rendimiento del motor. Estudios experimentales señalan la importancia de la geometría del orificio de la boquilla en la inyección global, y en el comportamiento del rociado [24], por lo que una buena mezcla del aire con el combustible, puede depender del número de orificios de la boquilla y del diámetro. Pueden generar efectos adversos en la combustión y emisiones, cuando el número de agujeros supera un cierto límite, esto puede ser por la falta de arrastre del aire necesario, para una mezcla estequiométrica [25]. De acuerdo con Yaliwal et al. [8] señalan, que con una boquilla de presión de inyección de combustible (230 bar), con un cierto número de orificios de la boquilla (4 orificios), y con un tamaño (0.25 mm), se podría obtener una preparación eficiente de la mezcla, con menos emisiones. Finalmente, de acuerdo con Battistoni et al. [26], informaron que, para mejorar el rendimiento del motor, la forma del orificio de la boquilla tiene un gran efecto en las características del spray, la descarga por pulverización desde un orificio no circular, es útil para mejorar la entrada del aire y mejorar sus características.

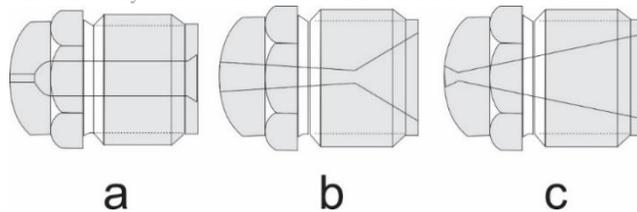


Figura 3: Tipos de boquillas, a) como general, b) como invertido, c) libre flujo.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2: Modificación en cuanto al diseño de la boquilla del inyector de combustible

Tipo de boquilla	Desempeño del motor	Referencia
Orificio de geometría cónica	Se encontró que la boquilla cónica produce el NOx más bajo, pero el Hollín alto, esto ocurre porque la boquilla aumenta la combustión premezclada y disminuye la combustión de difusión	[27]
Orificio convencional	Con la boquilla de orificio múltiple obtuvo emisiones de NOx altos con la boquilla de orificio convencional fueron menores	[28]
Diámetro de orificio de 0.090 mm	Con diferentes condiciones de carga y velocidad, observaron que la boquilla de menor tamaño de orificio (0.090 mm), tuvo el mejor desempeño y mayor BTE	[29]
Boquilla con una presión menor de 220 bares	Una presión de inyección de más de 220 bares, genera un aumento de BSFC, debido a la mala combustión ocasionó una menor penetración, con falta de oxígeno y un arrastre débil de aire	[30]
Menor diámetro del agujero	Descubrieron que el impulso, y la tasa de combustión, aumenta cuando existe un menor diámetro en el agujero	[31]
El orificio pequeño y alto de la boquilla	Se reduce el BSFC con un aumento del BTE, debido a la penetración de la potencia aumentada	[21]

Fuente: Elaboración propia.

c. Inyección del combustible piloto en motor diésel dual

Debido a la mala calidad de auto-ignición de los combustibles gaseosos en el motor diésel, es necesario inyectar un combustible piloto [32], la estrategia de inyección y la cantidad de combustible piloto, determina las emisiones de NOx en la combustión dual [33]. Los parámetros que influyen en la inyección piloto, son la presión de inyección, tiempo, cantidad y número de inyecciones. En el desarrollo de la combustión, y por consiguiente, en los niveles de emisión de los motores de combustión dual [34]. En la Tabla 3 se presenta el desempeño del motor, considerando el tiempo de inyección del combustible piloto. Para disminuir las emisiones derivadas de la combustión incompleta, algunas estrategias son; la inyección de combustible oxigenado, el uso de EGR caliente y técnicas para extender la presión de inyección o dividir el proceso de inyección [32].

Tabla 3: Desempeño del motor con el tiempo de inyección (TI) del combustible piloto.

Emisión que reduce	Emisión que aumenta	Desempeño de motor	Referencia
---	NOx	El sobrealimentador con inter-enfriamiento, da como resultado, mejor rendimiento en el motor	[35]
HC y CO	NOx	Mejora el BTE, cuando se le aplica al gas natural, un tiempo de inyección, con piloto avanzado	[36]
---	NOx	Se encontró un tiempo de inyección optimizado en autoignición con gas natural, pero se logró un mayor BTE con biogás	[34]
HC y CO	NOx y CO ₂	Con la mezcla de etanol con diésel, genera un incremento del BSFC con un tiempo de inyección de 27° BTDC	[37]
HC y CO	---	El tiempo de inyección del gas retardado, puede lograr una mezcla estratificada como aire-combustible, en condiciones de inyección piloto de 8° y 17° ATDC	[36]
NOx	---	Informaron que a plena carga con TI avanza de 55-60° BTDC, reduce el NOx, sin pérdida de eficiencia	[38]

Fuente: Elaboración propia.

En los biocombustibles gaseosos, existen dos formas para introducir (gas productor) al motor, que es por inducción múltiple o por inyección en la cámara de combustión. La principal diferencia entre los dos procesos, es que el sistema de inducción, utiliza el vacío creado por el motor, para atraer el aire junto con el gas productor, hacia la cámara de combustión, en cambio en el sistema de inyección directa, inyecta directamente el gas productor, a la cámara de combustión. Desafortunadamente la inducción en lugar de la inyección directa, ha generado una problemática por el incremento de las emisiones en el motor. Para una mayor eficiencia térmica usando gas productor, puede ser con aplicar la técnica de la sincronización avanzada de la inyección, y también con un aumento de la presión de inyección [39]. También se puede emplear el uso de inyección pulsada, inyección piloto y HCCI, todo esto con la finalidad de reducir emisiones y mejorar la eficiencia de combustión. Incluso el consumo mínimo de los biocombustibles, depende de los efectos del flujo en el cilindro, así lo comenta Davis et al. [40], en donde indicaron que los niveles de remolino, aplastamiento y turbulencia, deberían variar para poder producir un consumo mínimo de combustible. En el estudio de simulación numérica de Prasad et al. [41] informaron que, junto con el movimiento del aire y las características de pulverización, tales como la presión de inyección, el ángulo de pulverización, el diámetro del orificio del inyector y el tiempo de inyección, influyen significativamente sobre la combustión del motor, en la Tabla 4, se presenta la relación del avance del tiempo de inyección en la combustión piloto del motor.

El suministro de H₂ en el motor puede ser, por inyección de puerto, inyección directa y por la energía suministrada por inyección en el colector [42]. La inyección directa de H₂ produce, más seguridad, economía y respuesta [43]. El hidrógeno como combustible gaseoso alternativo, puede ser utilizado con inyectores mecánicos o electrónicos, siendo los inyectores electrónicos, los que permiten un mayor control

sobre el tiempo de inyección, y la duración de la inyección, con una respuesta rápida para operar en condiciones de alta velocidad [44]. En el caso de la inyección en el puerto aplicando gas combustible, genera un efecto de estratificación en mezcla del cilindro y en la carga [45], reduciendo con esto la eficiencia volumétrica. Lo cual produce una reducción de potencia, una forma para evitar esto, es con la inyección directa del combustible en la cámara de combustión. Sin embargo, los inyectores gaseosos de alta presión, no están disponibles a mercado abierto [46].

En el estudio de Papagiannakis et al. [47], analizaron la combustión y las emisiones de motor CI, alimentado de una mezcla de diésel (inyección directa) y gas natural (inyección de puerto) y encontraron una reducción del NOx. Comparativamente la inyección directa, es preferida en lugar de la inyección en puerto, esto último es para evitar el efecto del fuego trasero [48]. El contrafuego es la combustión que se produce durante la carrera de admisión, lo cual es de suma importancia, para evitar cualquier comportamiento no deseado, hasta por razones de seguridad. Por lo que la inyección directa en la cámara de combustión, es una solución prometedora de alta tecnología, donde una aguja concéntrica del inyector de alta presión de combustible múltiple, inyecta el combustible gaseoso. A presiones tan altas como 30 MPa (y recientemente 60 MPa) [49]. Con el H2 también se puede utilizar la inyección directa, pero requiere inyectores especialmente diseñados, para que puedan durar contra altas temperaturas y presiones en el cilindro [50]. En la aplicación de biocombustibles gaseosos, la inyección dividida puede ser una forma efectiva en bajas cargas, logrando con esto un aumento en la eficiencia y en la reducción de emisiones de HC, NOx y CO, en comparación con la estrategia de inyección única [51]. Finalmente, otra estrategia que mejora sin duda el desempeño del motor, es encontrar la diferencia de la inyección demasiado temprana, que lleva a una pobre calidad de atomización, de la temperatura inferior del cilindro. Por el contrario, la inyección demasiado tarde, puede generar una alta eficiencia térmica, con una combustión limpia (reducción de NOx y HC), con cargas livianas en modo de auto-ignición de dos etapas [34]. De acuerdo con el estudio de Huang et al. [52], analizaron el efecto de la sincronización de la inyección, en la combustión con la inyección directa del gas natural, y encontraron que la sincronización de temperatura en la inyección, conduce a una mayor duración de la combustión inicial, mientras que la inyección tardía, reduce la duración de la combustión inicial. Por lo tanto, el tiempo retardado de inyección en el gas natural, mejora el proceso de combustión y acelera la velocidad de propagación, de la llama en condiciones de operación de mezclas pobres [53]. En el caso del hidrógeno, la inyección temprana de combustión, puede llevar a un rápido aumento de presión dentro de la cámara de combustión, con una alta formación de NOx. En cambio, con el retraso de la inyección, puede reducir el NOx, pero al mismo tiempo puede llegar a generar una penalización de la eficiencia térmica [54].

Tabla 4: Efecto en el avance del tiempo del combustible piloto de inyección (TI) en el motor.

Combustible alternativo	Tiempo de inyección óptima	Desempeño del motor	Referencia
Biogás con una emulsión de biodiésel de salvado de arroz como combustible piloto	29° BTDC	Con ese valor óptimo se logró un buen desempeño, con una reducción de emisiones en el motor	[55]
Gas productor y como combustible piloto el aceite de honge como biodiésel	27° BTDC	Se encontró un tiempo de inyección optimizada, para los combustibles aplicados	[56]
Gas metano y propano	30° BTDC	Los resultados indican una pobre eficiencia y altas emisiones a baja carga, que pueden mejorarse con 30° BTDC con una reducción de CO y HC	[57]
Gas natural	35.5° BTDC	La prueba demuestra que, con el avance de TI óptimo, da lugar a una reducción de BTE, CO y CO ₂	[58]
Dimetil éter	7° BTDC	La prueba indicó que BSFC era más bajo, cuando TI fue avanzando a 7° BTDC	[59]

Fuente: Elaboración propia.

d. Avances tecnológicos en la inyección

Debido a que los biocombustibles, tienen diferentes características físicas y químicas que el petro-diésel convencional, se deben hacer modificaciones apropiadas en el sistema de inyección. La mayoría de los trabajos de motores alimentados con biodiésel, hacen uso de sistemas de inyección convencional, con PIO limitado de hasta con 300 bar, lo que conduce a BTE pobres, con mayores emisiones. Estos inconvenientes, pueden superarse con algunas estrategias, como emplear orificios de boquillas, cámara de combustión compatibles [22], y desde luego que mejorando o cambiando los parámetros de inyección, con la finalidad de mejorar el efecto del rendimiento, y reducir las emisiones del motor, entre estas estrategias encontramos, control en el tiempo de inyección, el ángulo de espera entre las inyecciones, la relación de masa de inyecciones, número de inyecciones y la presión de la inyección, entre otros [60]. Por lo que el desarrollo tecnológico de inyectores, como el sistema doble o inyección dividida (inyección simple, doble y triple), genera gran importancia en el futuro [61]. De la tecnología actual, se puede destacar la tecnología Common Rail Direct Injection (CRDI), la cual es la tecnología más ampliamente usada, en automóviles comerciales, con la finalidad de mejorar la eficiencia del combustible [62]. Los sistemas CRDI, brindan la oportunidad de inyectar el combustible en cualquier duración del tiempo, y con una presión de inyección superior, los motores CRDI con biodiésel, muestran un buen desempeño en el motor, con menores emisiones de HC, CO y humo, pero con un aumento de NOx [22]. Otra alternativa es la estrategia de combustión avanzada, conocida como encendido por compresión múltiple premezclada (MPCI), que cuando se emplea logra la separación de la liberación de calor, durante las inyecciones múltiples, incluso en cargas elevadas [63]. Por lo tanto, las estrategias de inyección más avanzadas, pueden incluir la inyección múltiple, que tiene la intención de reducir los contaminantes emitidos del motor, en sus dos tipos de inyección múltiple, los cuales son la inyección piloto y la inyección dividida [60]. En la Tabla 5, se analiza la aplicación de la inyección dividida usando el biodiésel. La inyección piloto no reduce el NOx ni el PM, a menos que se optimicen con EGR, IT, cantidad y permanencia antes de la inyección principal [64]. En la inyección dividida, el combustible es dividido en 2 o más proporciones iguales, inyectándose de forma consecutiva, pero no continua. Uno de los propósitos, es asegurar que se pueda formar un combustible altamente premezclado, entre sus beneficios están, las pruebas piloto y las inyecciones divididas [65].

Tabla 5: Análisis de la inyección dividida en motor con biodiésel.

Emisiones que reduce	Desempeño de motor	Referencia
NOx	La inyección dividida reduce el NOx y Hollín	[66]
Humo	Con un motor post-inyección, logra reducir el humo	[67]
NOx y Humo	Con la inyección dividida, reduce las emisiones, pero también disminuye el rendimiento	[61]
NOx	El esquema de inyección, reduce la velocidad de combustión durante la fase de combustión premezclada, por lo que genera bajas temperaturas en el cilindro	[68]

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6 se presenta la importancia que tiene la presión en la inyección, cuando se emplea con biocombustibles. Un estudio de varias alternativas de inyección aplicando biodiésel como biocombustible, lo realizaron Reddy et al. [69], en donde en un motor diésel de inyección directa, usaron biodiésel de aceite de *Jatropha*, en el estudio modificaron la temporización de inyección, presión de apertura del inyector y la velocidad de inyección, con la finalidad de analizar el rendimiento, las emisiones y la combustión. Los resultados muestran que el aceite de *Jatropha* puro, mejora el BTE cuando se le aumenta 15 bar en la presión de apertura del inyector, y 3 grados en avance del inyector del combustible. Además, mejora la tasa de liberación máxima de calor, con una reducción de emisiones (con excepción de NOx). En el estudio de Lalvani et al. [70], realizaron pruebas en motor de un solo cilindro (4 tiempos) DI motor diésel, con pistón inductor convencional, en una mezcla de 20% de biodiésel y 80% de diésel. Las pruebas se realizaron con diferentes presiones de inyección (110, 210, 220 y 230 bar). Los resultados muestran que el pistón inductor de turbulencia, dio mayor valor de presión, debido a las ranuras tangenciales que mejoran la mezcla del aire y combustible, en la cámara de combustión.

Tabla 6: Influencia de la presión de inyección de combustibles alternativos en el motor.

Tipos de combustible alternativo	Presión de inyección de combustible óptima	Condiciones de operación	Referencia
Mezcla de 20% de biodiésel de maíz, 20% de biodiésel de soja, y el resto de diésel	3 presiones de inyección (180, 190 y 200 bares) la mejor opción fue la presión más alta	Se encontró que la presión de inyección más alta, genera la mejor economía de combustible y mejor BTE	[71]
Biodiésel de aceite de semilla de cártamo	200, 215 y 230 bares, la presión más alta fue el mejor resultado	La mayor presión y potencia de inyección, causo un aumento del par motor y redujo el BSFC	[11]
Biodiésel con la mezcla de diésel	La mayor presión de inyección de combustible	El biodiésel desempeña un papel importante en la atomización, y la presión máxima, mejora la penetración de la pulverización	[72]
Biodiésel de aceite de canola, en mezcla con diésel	Pruebas con 4 presiones (180, 200, 220 y 240 bares), la mejor fue la más alta	Se realizó las pruebas, a una velocidad del motor con diferentes cargas, la presión mayor dio los mejores resultados de BTE y BSFC	[73]
Mezcla de diésel con metanol	La mejor opción fue, cuando la presión de inyección incrementa	Descubrieron que cuando la presión de inyección incrementa, la inyección del diésel avanza	[74]
Biodiésel de <i>Jatropha</i> éster metílico	Pruebas de 3 presiones (150, 200 y 120 bares), la mejor fue la mayor presión	Una mayor presión de inyección, y mayores relaciones de compresión logran un mayor rendimiento	[75]

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7, se presentan la influencia de la inyección de combustibles alternativos y sus emisiones. Otros biocombustibles líquidos que pueden ser usados en la inyección, son los alcoholes, los cuales se pueden usar en el motor CI, ya sea a través de la fumigación, en donde se inyecta el alcohol en combustión dual generando una mezcla de alcohol con diésel, y como emulsión alcohol-diésel [76]. Uno de los métodos más comunes para reducir, la viscosidad del aceite vegetal y del biodiésel, es la adición de n-butanol (alcohol de cadena larga). La cual mejora la atomización del combustible, mejorando la combustión, y por lo tanto, reduce los depósitos de carbono, que se pueden encontrar en los aros de pistón, paredes de cilindro y en los inyectores [77]. El usar el biocombustible DME (dimetil éter), tiene algunas ventajas, puesto que a medida que se inyecta, este se enfría en la carga del cilindro, este efecto de enfriamiento, se puede combinar con una propagación de la llama más lenta, así como una menor temperatura en el cilindro con lo que se asocia a una menor presión del cilindro, el resultado es una reducción del NOx particularmente en cargas parciales. Pero el uso de DME, implica un diseño de inyector, bomba de alimentación de combustible, y alta presión de la bomba de inyección, todo esto debe ser modificado [78]. Otro inconveniente es su menor valor de calentamiento (alrededor de 28.4 MJ/kg), por lo que requiere casi el doble de la cantidad de combustible inyectado por ciclo, para tener una potencia del motor similar, comparándolo al combustible convencional [79]. Además de un bajo punto de ebullición del DME, y su rápida evaporación, requiere almacenarlo bajo presión constante, para mantenerlo en fase líquida y evitar la evaporación [80]. Otro de los alcoholes que puede ser aplicado al motor, es el metanol. En el estudio de Wei et al. [81], estudiaron la combustión y las emisiones, aplicando inyección directa dentro de la cámara de combustión, y realizaron pruebas con mezclas de hasta 70% de metanol, con 30% de combustible diésel. Esta mezcla (70% de metanol) logró una reducción de emisiones de NOx y el hollín. En el estudio de Yao et al. [82], analizaron en un motor diésel turbo-reforzado, inter-enfriado de inyección directa, en el motor emplearon mezclas de n-butanol. Informaron un aumento de BSFC (consumo de combustible específico al freno) en mezclas de n-butanol, esto se le atribuye al bajo poder calorífico que tiene el n-butanol, en comparación al diésel, pero también se tuvo una reducción de hollín y CO, esto se le atribuye a la duración de inyección, relativamente más larga en comparación con el diésel. Finalmente, otro de los biocombustibles líquidos que se puede encontrar, es el combustible de la pirolisis líquida, en el estudio de Singh et al. [83], utilizaron pirolisis líquida, como combustible principal, y diésel como combustible piloto, se indica que se necesitan modificaciones sustanciales en la culata, para acomodar la inyección dual, si bien se logró un funcionamiento estable del motor, no se evitó la corrosión y la erosión de los inyectores.

Tabla 7: Influencia en la inyección de combustibles alternativos y sus emisiones.

Tipo de biocombustible	Emisión que reduce	Estrategia de inyección	Condiciones de operación	Referencia
Biodiésel de aceite de karanja	PM	Aumentar la presión de inyección	A mayor presión, genera más tiempo para la mezcla	[84]
Biodiésel en mezcla con n-butanol	NOx y Hollín	Mayor presión de inyección	A mayor presión con la inyección de n-butanol, reduce emisiones	[85]
Mezcla de 50% biodiésel de aceite de hene y 50% de diésel	CO, HC y Humo	4 pruebas de 200,220,240 y 260 bares, la mayor presión de inyección fue la correcta	Con el aumento de la presión de inyección este reduce emisiones, pero con el aumento del NOx y el BTE	[86]
Biodiésel de Jatropha metil éster	CO ₂ y Humo	Mayor presión de inyección a 250 bares	Con la mayor presión de inyección, se logró el máximo rendimiento, con un aumento de BTE, pero con un aumento de HC	[75]
Biodiésel de aceite de Jatropha	CO, HC y Humo	Avanzando el tiempo de inyección	Se genera un aumento de BTE, pero se incrementa el NOx	[87]
Biodiésel de Calophyllum inophyllum	HC, CO y Humo	3 pruebas (200,220 y 240 bares), con la de 220 bares se redujeron más las emisiones	La mayor presión de inyección, reduce el BSFC, pero la mayor reducción de emisiones, fue en la de 220 bares	[88]
Biodiésel de aceite de cocina usado	NOx y Humo	Retraso de tiempo de inyección	En un motor CRDI, el biodiésel reduce el Hollín, con el retraso de tiempo de inyección, reduce el NOx	[89]

Fuente: Elaboración propia.

IV. CONCLUSIONES

Los motores convencionales no están diseñados para usarlos con biocombustibles, esto obliga que sean modificados los motores para que de esta manera puedan funcionar adecuadamente con combustibles alternativos, uno de los parámetros prioritarios del motor diésel es sin duda el inyector y ahí es donde existe una amplia gama de factores que pueden influir en su funcionamiento en donde el avance tecnológico es pieza fundamental para su desarrollo, en este trabajo concluimos que se debe dar mayor énfasis a la geometría de la boquilla debido a que el biodiésel por ejemplo tiene una mayor viscosidad que el resto de los combustibles y esto por supuesto que influye en la mezcla y distribución de biodiésel con el aire, así como su capacidad de homogeneidad y aprovechamiento en la cámara de combustión, pero si se tratará del biogás, este por sus propiedades distintas del biodiésel, tendría que aplicar otro empleo de inyección, por esa razón los inyectores deben depender del biocombustible que sea empleada. En un combustible gaseoso, la inyección directa ayuda a reducir emisiones, es más segura, económica y de mayor respuesta, al aplicarle, como el hidrógeno, también benefician los inyectores electrónicos, siendo estos los que generan mayor control sobre el tiempo y duración de la inyección, generando una respuesta rápida en condiciones rápidas. Sin embargo, los inyectores gaseosos de alta presión, no están disponibles al mercado abierto. Los avances tecnológicos en la inyección en el motor serán cruciales para el uso de las combustibles alternativos en el futuro.

V. REFERENCIAS

- [1] F.Y. Hagos, A.R.A. Aziz, y S.A. Sulaiman. "Trends of Syngas as a Fuel in Internal Combustion Engines", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 6, 2014. doi: [10.1155/2014/401587](https://doi.org/10.1155/2014/401587).
- [2] H.S. Aydin y H. Bayindir. "Performance and Emission Analysis of Cottonseed Oil Methyl Ester in a Diesel Engine", *Renewable Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 588-592, 2010.
- [3] F.Y. Hagos, A.R.A. Aziz, S.A. Sulaiman y B.K.M. Mahgoub. "Low and Medium Calorific Value Gasification Gas Combustion in IC Engines", *Developments in Combustion Technology*, 2016. doi: [10.5772/64459](https://doi.org/10.5772/64459).
- [4] K. Saikaly, O. Le Corre, C. Rahmouni y L. Truffet. "Preventive Knock Protection Technique for Stationary SI Engines Fuelled by Natural Gas", *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no. 6, pp. 641-652, 2010.
- [5] R. McCormick, M. Graboski, T. Alleman, A. Herring y S. Tyson. "Impact of Biodiesel Source Material and Chemical Structure on Emissions of Criteria Pollutants from a Heavy-Duty Engine", *Environmental Science & Technology*, vol. 35, no.9, 1742-1747, 2001.
- [6] Y.S. Kim, J.J. Lee, T.S. Kim y J.L. Sohn. "Effects of Syngas Type on the Operation and Performance of a Gas Turbine in Integrated Gasification Combined Cycle", *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 5, pp. 2262-2271, 2011.
- [7] R. Chacartegui, D. Sánchez, J.M. Muñoz de Escalona, A. Muñoz y T. Sánchez. "Gas and Steam Combined Cycles for Low Calorific Syngas Fuels Utilization", *Applied Energy*, Volume 101, pp. 81-92, 2013, doi: [10.1016/j.apenergy.2012.02.041](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.041).
- [8] V.S. Yaliwal, N.R. Banapurmath, N.M. Gireesh, R.S. Hosmath, T. Donateo y P.G. Tewari. "Effect of Nozzle and Combustion Chamber Geometry on the Performance of a Diesel Engine Operated on Dual Fuel Mode Using Renewable Fuels", *Renewable Energy*, Volume 93, Pages 483-501, 2016, doi: [10.1016/j.renene.2016.03.020](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.020).
- [9] A.I. Ramirez, S. Som, T.P. Rutter, D.E. Longman y S.K. Aggarwal. "Investigation of the Effects of Rate of Injection on Combustion Phasing and Emission Characteristics: Experimental and Numerical Study", *Spring Technical Meeting of the Central States Section of the Combustion Institute*, pp. 1-16, 2012.
- [10] F.Y. Hagos, A.R.A. Aziz, S.A. Sulaiman y Firmansyah. "Combustion Characteristics of Late Injected CNG in a Spark Ignition Engine under Lean Operating Condition", *Journal of Applied Sciences*, vol. 12, pp. 2368-2375, 2012.
- [11] H. Ögüt, H. Oğuz y F. Aydin. "The Effect of Engine Performance of Different Injector Pressure at Safflower Oil Biodiesel Fuel", *Journal of Agricultural Machinery Science*, vol. 9, no. 2, pp. 93-97, 2013.
- [12] J. Hwang, D. Qi, Y. Jung y C. Bae. "Effect of Injection Parameters on the Combustion and Emission Characteristics in a Common Rail Direct Injection Diesel Engine Fueled with Waste Cooking Oil Biodiesel", *Renewable Energy*, vol. 63, pp. 9-17, 2014.
- [13] K. Ryu. "Effects of Pilot Injection Timing on the Combustion and Emissions Characteristics in a Diesel Engine Using Biodiesel CNG Dual Fuel", *Applied Energy*, vol. 111, pp. 721-730, 2013.
- [14] A. Boretti. "Advantages of the Direct Injection of Both Diesel and Hydrogen in Dual Fuel H2ICE", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 15, pp. 9312-9317, 2011.

- [15] A.A. Hairuddin, T. Yusaf y A.P. Wandel. "A Review of Hydrogen and Natural Gas Addition in Diesel HCCI Engines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 32, Pages 739-761, 2014, doi: [10.1016/j.rser.2014.01.018](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.018).
- [16] Y.-Y. Wu, B.-C. Chen, H.-C. Tsai, A.-T. Tran y S.-C. Hsiao. "Design and Control of Semi-direct Injection Spark Ignition Engine Fuelled by LPG", *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 850–853, 2014.
- [17] D. Barik y S. Murugan. "Experimental Investigation on the Behavior of a DI Diesel Engine Fueled with Raw Biogas–Diesel Dual Fuel at Different Injection Timing", *Journal of the Energy Institute*, vol. 89, pp. 373–388, 2016.
- [18] J.H. Liu, A.R. Yao y C.D. Yao. "Effects of Diesel Injection Pressure on the Performance and Emissions of a HD Common-Rail Diesel Engine Fueled with Diesel/Methanol Dual Fuel", *Fuel*, Volume 140, pp. 192–200, 2015, DOI: [10.1016/j.fuel.2014.09.109](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.109).
- [19] S. Hassan, Z.A. Zainal y M.A. Miskam. "Effects of Advanced Injection Timing on Performance and Emission of a Supercharged Dual-Fuel Diesel Engine Fueled by Producer Gas from Downdraft Gasifier", *Science and Industrial Research*, vol. 70, no. 3, pp. 220–224, 2011.
- [20] A. Nande, T. Wallner y J. Naber. "Influence of Water Injection on Performance and Emissions of a Direct-Injection Hydrogen Research Engine", *SAE Technical Paper*, No. 2008-01-2377, 2008.
- [21] P. Varun, S.K. Singh, R. Tiwari, N. Singh y Kumar. "Modification in Combustion Chamber Geometry of CI Engines for Suitability of Biodiesel: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 79, Pages 1016-1033, 2017, doi: [10.1016/j.rser.2017.05.116](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.116).
- [22] S.V. Khandal, N.R. Banapurmath, V.N. Gaitonde y S.S. Hiremath. "Paradigm Shift from Mechanical Direct Injection Diesel Engines to Advanced Injection Strategies of Diesel Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines- A Comprehensive Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 70, pp. 369-384, 2017, doi: [10.1016/j.rser.2016.11.058](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.058).
- [23] Y. Li, A. Kirkpatrick, C. Mitchell y B. Willson. "Characteristic and Computational Fluid Dynamics Modeling of High-Pressure Gas Jet Injection", *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol.126, no. 1, pp. 192-197, 2004.
- [24] C. Sayin, M. Gumus y M. Canakci. "Influence of Injector Hole Number on the Performance and Emissions of a DI Diesel Engine Fueled with Biodiesel-Diesel Fuel Blends", *Applied Thermal Engineering*, vol. 61, no. 2, pp. 121-128, 2013.
- [25] B.H. Lee, J.H. Song, Y.J. Chang y C.H. Jeon. "Effect of the Number of Fuel Injector Holes on Characteristics of Combustion and Emissions in a Diesel Engine", *International Journal of Automotive Technology*, vol. 11, no. 6, pp. 783-791, 2010, doi: [10.1007/s12239-010-0093-2](https://doi.org/10.1007/s12239-010-0093-2).
- [26] M. Battistoni y C.N. Grimaldi. "Numerical Analysis of Injector Flow and Spray Characteristics from Diesel Injectors Using Fossil and Biodiesel Fuels", *Applied Energy*, vol. 97, pp. 656-666, 2012.
- [27] S. Som, A.I. Ramirez, D.E. Longman y S.K. Aggarwal. "Effect of Nozzle Orifice Geometry on Spray, Combustion, and Emission Characteristics Under Diesel Engine Conditions", *Fuel*, vol. 90, no. 3, pp. 267–276, 2011.
- [28] S.W. Park y R.D. Reitz. "Modeling the Effect of Injector Nozzle-Hole Layout on Diesel Engine Fuel Consumption and Emissions", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 130, no. 3, pp. 1–10, 2008.
- [29] P.A.R. Bergstrand. "Diesel Combustion with Reduced Nozzle Orifice Diameter", *SAE Technical Paper*, no. 2001-01-2010, 2001.
- [30] S. Jaichandar, K. Annamalai. "Combined impact of injection pressure and combustion chamber geometry on the performance of a biodiesel fueled diesel engine," *Energy*, vol. 55, pp. 330-339, 2013.
- [31] J.M. Desantes, J.M. Garcia-Oliver, J.M. Pastor, J.G. Ramirez-Hernandez. "Influence of nozzle geometry on ignition and combustion for high-speed direct injection diesel engines under cold start conditions," *Fuel*, vol. 90, no. 11, pp. 3359-3368, 2011.
- [32] J.J. Hernández, M. Lapuerta, J. Barba. "Effect of partial replacement of diesel or biodiesel with gas from biomass gasification in a diesel engine," *Energy*, vol. 89, pp. 148-157, 2015, doi: [10.1016/j.energy.2015.07.050](https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.050).
- [33] Y. Chen, J. Ma, B. Han, P. Zhang, H. Hua, H. Chen, X. Su. "Emissions of automobiles fueled with alternative fuels based on engine technology: A review," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 5, no. 4, pp. 318-334, 2018, doi: [10.1016/j.jtte.2018.05.001](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.05.001).
- [34] Z. Wang, Z. Zhao, D. Wang, M. Tan, Y. Han, Z. Liu, H. Dou. "Impact of pilot diesel ignition mode on combustion and emissions characteristics of a diesel/natural gas dual fuel heavy-duty engine," *Fuel*, vol. 167, pp. 248-256, 2016, doi: [10.1016/j.fuel.2015.11.077](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.077).
- [35] B. Jayashankara, V. Ganesan. "Effect of fuel injection timing and intake pressure on the performance of a DI diesel engine – a parametric study using CFD," *Energy Convers Manage*, vol. 51, pp. 1835-1848, 2010.
- [36] B. Yang, C. Xi, X. Wei, K. Zeng, M. Lai. "Parametric investigation of natural gas port injection and diesel pilot injection on the combustion and emissions of a turbocharged common rail dual-fuel engine at low load," *Appl Energy*, vol. 143, pp. 130-137, 2015, doi: [10.1016/j.apenergy.2015.01.037](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.037).
- [37] C. Sayin, M. Canakci. "Effects of injection timing on the engine performance and exhaust emissions of a dual-fuel diesel engine," *Energ. Conv. Manage.*, vol. 50, pp. 203-213, 2009, doi: [10.1016/j.enconman.2008.06.007](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.06.007).
- [38] S.R. Krishnan, K.K. Srinivasan, S. Singh, S.R. Bell, K.C. Midkiff, W. Gong, S.B. Fiveland, M. Willi. "Strategies for reduced NOx emissions in pilot-ignited natural gas engines," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 126, no. 3, pp. 665-671, 2004, doi: [10.1115/1.1760530](https://doi.org/10.1115/1.1760530).
- [39] V.S. Yaliwal, N.R. Banapurmath, P.G. Tewari. "Combustion and emission characteristics of a single-cylinder, four-stroke, direct injection diesel engine operated on a dual-fuel mode using Honge oil methyl ester and producer gas derived from biomass feedstock of different origin," *Sustain Eng*, vol. 7, no. 3, pp. 253-268, 2013, doi: [10.1080/19397038.2013.834395](https://doi.org/10.1080/19397038.2013.834395).
- [40] C.C. Davis, C. Borgnakke. "The effect of in-cylinder processes (swirl, squish and turbulence intensity) on engine efficiency-model predictions," *SAE paper* – 962086, 1996.
- [41] B.V.V. Prasad, C.S. Sharma, T.N.C. Anand, R.V. Ravikrishna. "High swirl-inducing piston bowls in small diesel engines for emission reduction," *Appl Energy*, vol. 88, pp. 2355-2367, 2011.
- [42] V. Chintala, K.A. Subramanian. "A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 472-491, 2017, doi: [10.1016/j.rser.2016.11.247](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.247).
- [43] H.A. Khairallah, U. Koylu. "Combustion simulation of a direct injection diesel engine with hydrogen fuel using a 3D model with multi-fuel chemical kinetics," *SAE Technical Paper*, no. 2014-01-1317, 2014.
- [44] B. Gamiño, J. Aguilón. "Numerical simulation of syngas combustion with a multi-spark ignition system in a diesel engine adapted to work at the Otto cycle," *Fuel*, vol. 89, no. 3, pp. 581-591, 2010, doi: [10.1016/j.fuel.2009.06.030](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.06.030).
- [45] A.P. Carlucci, D. Laforgia, R. Saracino, G. Toto. "Combustion and emissions control in diesel–methane dual fuel engines: the effects of methane supply method combined with variable in-cylinder charge bulk motion," *Energy Convers Manage*, vol. 52, no. 8-9, pp. 3004-3017, 2011, doi: [10.1016/j.enconman.2011.04.012](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.012).
- [46] H.M. Cho, B. He. "Spark ignition natural gas engines – a review," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, no. 2, pp. 608-618, 2007.
- [47] R.G. Papagiannakis, D.T. Hountalas. "Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas," *Energy Convers Manage*, vol. 45, pp. 2971-2987, 2004.

- [48] H. Fayaz, R. Saidur, N. Razali, F.S. Anuar, A.R. Saleman, M.R. Islam. "An overview of hydrogen as a vehicle fuel," *Renew Sust Energy Rev*, vol. 16, pp. 5511-5528, 2012.
- [49] A. Hegab, A. La Rocca, P. Shaylor. "Towards keeping diesel fuel supply and demand in balance: Dual-fuelling of diesel engines with natural gas," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 666-697, 2017, doi: [10.1016/j.rser.2016.11.249](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.249).
- [50] P. Roshia, A. Dhir, S.K. Mohapatra. "Influence of gaseous fuel induction on the various engine characteristics of a dual fuel compression ignition engine: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pt. 3, pp. 3333-3349, 2018, doi: [10.1016/j.rser.2017.10.055](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.055).
- [51] A.P. Carlucci, A. Ficarella, D. Laforgia, L. Strafella. "Improvement of dual-fuel biodiesel-producer gas engine performance acting on biodiesel injection parameters and strategy," *Fuel*, vol. 209, pp. 754-768, 2017, doi: [10.1016/j.fuel.2017.07.100](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.100).
- [52] Z. Huang, S. Shiga, T. Ueda, H. Nakamura, T. Ishima, T. Obokata, M. Tsue, M. Kono. "Effect of fuel injection timing relative to ignition timing on the natural-gas direct-injection combustion," *J Eng Gas Turbines Power*, vol. 125, no. 3, pp. 783-790, 2003, doi: [10.1115/1.1563243](https://doi.org/10.1115/1.1563243).
- [53] B. Yang, X. Wei, C. Xi, Y. Liu, K. Zeng, M.-C. Lai. "Experimental study of the effects of natural gas injection timing on the combustion performance and emissions of a turbocharged common rail dual-fuel engine," *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 297-304, 2014, doi: [10.1016/j.enconman.2014.07.030](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.030).
- [54] P. Dimitriou, T. Tsujimura. "A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 38, pp. 24470-24486, 2017, doi: [10.1016/j.ijhydene.2017.07.232](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.232).
- [55] B.J. Bora y U.K. Saha, "Improving the performance of a biogas powered dual fuel diesel engine using emulsified rice bran biodiesel as pilot fuel through adjustment of compression ratio and injection timing," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 137, no. 9, pp. 091505-1–091505-14, 2015, doi: [10.1115/1.4029708](https://doi.org/10.1115/1.4029708).
- [56] N.R. Banapurmath, P.G. Tewari y R.S. Hosmath, "Experimental investigations of a four-stroke single cylinder direct injection diesel engine operated on dual fuel mode with producer gas as inducted fuel and Honge oil and its methyl ester (HOME) as injected fuels," *Renew. Energy*, vol. 33, pp. 2007–2018, 2008, doi: [10.1016/j.renene.2007.11.017](https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.11.017).
- [57] C.H. Abd-Alla, H.A. Soliman, O.A. Badr y M.F. Abd Rabbo, "Effect of injection timing on the performance of a dual fuel engine," *Energ. Conv. Manage.*, vol. 43, pp. 269–277, 2002, doi: [10.1016/S0196-8904\(00\)00168-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00168-0).
- [58] O.M.I. Nwafor, "Effect of advanced injection timing on the performance of natural gas in diesel engines," *Sadhana*, vol. 25, pp. 11–20, 2000.
- [59] Y. Wang, Y. Zhao, F. Xiao y D. Li, "Combustion and emission characteristics of a diesel engine with DME as port premixing fuel under different injection timing," *Energ. Conv. Manage.*, vol. 77, pp. 52–60, 2014, doi: [10.1016/j.enconman.2013.09.011](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.011).
- [60] Y.H. Teoh, H.H. Masjuki, H.G. How, M.A. Kalam, K.H. Yu y A. Alabdulkarem, "Effect of two-stage injection dwell angle on engine combustion and performance characteristics of a common-rail diesel engine fueled with coconut oil methyl esters-diesel fuel blends," *Fuel*, vol. 234, pp. 227-237, 2018, doi: [10.1016/j.fuel.2018.07.036](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.036).
- [61] H.G. How, H.H. Masjuki, M.A. Kalam y Y.H. Teoh, "Influence of injection timing and split injection strategies on performance, emissions, and combustion characteristics of diesel engine fueled with biodiesel blended fuels," *Fuel*, vol. 213, pp. 106-114, 2018, doi: [10.1016/j.fuel.2017.10.102](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.102).
- [62] B. Ashok, K. Nanthagopal, B. Saravanan, P. Somasundaram, C. Jegadheesan, B. Chaturvedi, S. Sharma y G. Patni, "A novel study on the effect lemon peel oil as a fuel in CRDI engine at various injection strategies," *Energy Conversion and Management*, vol. 172, pp. 517-528, 2018, doi: [10.1016/j.enconman.2018.07.037](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.037).
- [63] C. Bae y J. Kim, "Alternative fuels for internal combustion engines," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 36, no. 3, pp. 3389-3413, 2017, doi: [10.1016/j.proci.2016.09.009](https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.09.009).
- [64] S.K. Chen, "Simultaneous reduction of NOx and Particulate emissions by using multiple injections in a small diesel engine," *SAE Paper No. 2000-01-3084*, pp. 1-10, 2000.
- [65] E. Alptekin, "Emission, injection and combustion characteristics of biodiesel and oxygenated fuel blends in a common rail diesel engine," *Energy*, vol. 119, pp. 44–52, 2017.
- [66] M.Y. Kim, S.H. Yoon y C.S. Lee, "Impact of split injection strategy on the exhaust emissions and soot particulates from a compression ignition engine fueled with neat biodiesel," *Energy Fuels*, vol. 22, no. 2, pp. 1260–1265, 2008.
- [67] V. Stringer, W. Cheng, C. Lee y A. Hansen, "Combustion and Emissions of Biodiesel and Diesel Fuels in Direct Injection Compression Ignition Engines using Multiple Injection Strategies," *SAE Technical Paper 2008-01-1388*, 2008, doi: [10.4271/2008-01-1388](https://doi.org/10.4271/2008-01-1388).
- [68] C.Y. Choi y R.D. Reitz, "An experimental study on the effects of oxygenated fuel blends and multiple injection strategies on DI diesel engine emissions," *Fuel*, vol. 78, no. 11, pp. 1303–1317, 1999.
- [69] J.N. Reddy y A. Ramesh, "Parametric studies for improving the performance of a jatropha oil-fuelled compression ignition engine," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 12, pp. 1994–2016, 2006.
- [70] J.I.J. Lalvani, M. Parthasarathy, B. Dhinesh y K. Annamalai, "Pooled effect of injection pressure and turbulence inducer piston on performance, combustion, and emission characteristics of a DI diesel engine powered with biodiesel blend," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 134, pp. 336–343, 2016.
- [71] M.S. Shehata, A.M. Attia y S.A. Razeq, "Corn and soybean biodiesel blends as alternative fuels for diesel engine at different injection pressures," *Fuel*, vol. 161, pp. 49–58, 2015, doi: [10.1016/j.fuel.2015.08.037](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.08.037).
- [72] A.R. Ghahremani, M.H. Saidi, A. Hajinezhad y A.A. Mozafari, "Experimental investigation of spray characteristics of a modified biodiesel in a direct injection combustion chamber," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 81, pp. 445–453, 2017, doi: [10.1016/j.expthermflusci.2016.09.010](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.09.010).
- [73] C. Sayin, M. Gumus y M. Canakci, "Effect of fuel injection pressure on the injection, combustion and performance characteristics of a DI diesel engine fueled with canola oil methyl esters-diesel fuel blends," *Biomass Bioenergy*, vol. 46, pp. 435–446, 2012, doi: [10.1016/j.biombioe.2012.07.016](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.07.016).
- [74] Z. Chen, C. Yao, A. Yao, Z. Dou, B. Wang, H. Wei, M. Liu, C. Chen y J. Shi, "The impact of methanol injecting position on cylinder-to-cylinder variation in a diesel methanol dual fuel engine," *Fuel*, vol. 191, pp. 150–163, 2017, doi: [10.1016/j.fuel.2016.11.072](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.072).
- [75] S. Jindal, B.P. Nandwana, N.S. Rathore y V. Manistha, "Experimental investigation of the effect of compression ratio and injection pressure in a direct injection diesel engine running on Jatropha methyl ester," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 5, pp. 442–448, 2010, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2009.10.004](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.10.004).
- [76] D.P. Satsangi y N. Tiwari, "Experimental investigation on combustion, noise, vibrations, performance and emissions characteristics of diesel/n-butanol blends driven genset engine," *Fuel*, vol. 221, pp. 44–60, 2018, doi: [10.1016/j.fuel.2018.02.060](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.060).

- [77] S.S. Prabu, M.A. Asokan, S. Prathiba, S. Ahmed y G. Puthean, "Effect of additives on performance, combustion and emission behavior of preheated palm oil/diesel blends in DI diesel engine," *Renewable Energy*, vol. 122, pp. 196–205, 2018, doi: [10.1016/j.renene.2018.01.068](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.068).
- [78] S.H. Park y C.S. Lee, "Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel," *Energy Convers Manage*, vol. 86, pp. 848–863, 2014.
- [79] G. Thomas, B. Feng, A. Veeraragavan, M.J. Cleary y N. Drinnan, "Emissions from DME combustion in diesel engines and their implications on meeting future emission norms: A review," *Fuel Process Technol*, vol. 119, pp. 286–304, 2014.
- [80] R.J. Crookes y K.D.H. Bob-Manuel, "RME or DME: A preferred alternative fuel option for future diesel engine operation," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, no. 11, pp. 2971–2977, 2007, doi: [10.1016/j.enconman.2007.07.002](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.07.002).
- [81] L. Wei, C. Yao, Q. Wang, W. Pan y G. Han, "Combustion and emission characteristics of a turbocharged diesel engine using high premixed ratio of methanol and diesel fuel," *Fuel*, vol. 140, pp. 156–163, 2015, doi: [10.1016/j.fuel.2014.09.070](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.070).
- [82] M. Yao, H. Wang, Z. Zheng y Y. Yue, "Experimental study of n-butanol additive and multi-injection on HD diesel engine performance and emissions," *Fuel*, vol. 89, no. 9, pp. 2191–2201, 2010.
- [83] B. Singh, D. Hansdah y S. Murugan, "Performance and exhaust emissions of a diesel engine using pyrolysis oil from waste frying oil and castor oil mixture," en *International Conference on Sustainable Mobility*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 1–3, 2010.
- [84] A.K. Agarwal, A. Dhar, D.K. Srivastava, R.K. Maurya y A.P. Singh, "Effect of fuel injection pressure on diesel particulate size and number distribution in a CRDI single cylinder research engine," *Fuel*, vol. 107, pp. 84–89, 2013.
- [85] V. Soloiu, M. Duggan, H. Ochieng, S. Harp, J. Weaver, C. Jenkins y B. Vlcek, "Premixed charge of n-butanol coupled with direct injection of biodiesel for an advantageous soot-NOX trade-off," *SAE Technical Paper*, vol. 01, p. 0916, 2013.
- [86] K.V. Belagur y R.V. Chitimini, "Effect of injector opening pressures on the performance, emission and combustion characteristics of DI diesel engine running on honne oil and diesel fuel blend," *Thermal Science*, vol. 14, no. 4, pp. 1051–1061, 2010.
- [87] T. Ganapathy, R.P. Gakkhar y K. Murugesan, "Influence of injection timing on performance, combustion and emission characteristics of Jatropha biodiesel engine," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 4376–4386, 2011.
- [88] K. Nanthagopal, B. Ashok y R.T.K. Raj, "Influence of fuel injection pressures on Calophyllum inophyllum methyl ester fuelled direct injection diesel engine," *Energy Conversion and Management*, vol. 116, pp. 165–173, 2016.
- [89] D. Qi, C. Lee y Y. Lin, "Effect of Injection Parameters and EGR on the Particle Size Distributions and Exhaust Emissions for Diesel and Biodiesel Fuels in CRDI Engine," *SAE Technical Paper 2014-01-1612*, 2014. DOI: [10.4271/2014-01-1612](https://doi.org/10.4271/2014-01-1612).