

Uso de alcohol como combustible en motores de combustión interna

Use of alcohol as fuel in internal combustion engines

Utilização de álcool como combustível
em motores de combustão interna

Héctor Hugo Riojas González^a

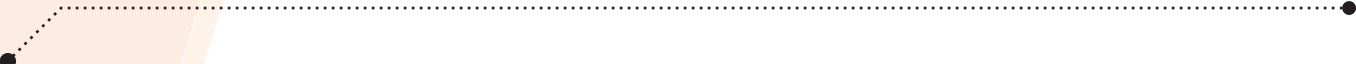
Héctor A. Ruiz^b

Liborio Jesús Bortoni Anzures^a

Juan Julián Martínez Torres^a

^aUniversidad Politécnica de Victoria, 87138 Cd Victoria, Tamps, México. hriojasg@upv.edu.mx, lbortoni@upv.edu.mx, jmartinezt@upv.edu.mx

^bGrupo de Biorrefinería, Departamento de Investigación en Alimentos, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, 25280, Saltillo, Coahuila, México. hector_ruiz_leza@uadec.edu.mx



Resumen— El uso de biocombustibles renovables puede desempeñar un papel protagónico en la seguridad energética, así como para reducir la dependencia del petróleo, que por cierto se está agotando. Entre los biocombustibles líquidos se encuentra el alcohol el cual su composición y propiedades dependerá de las materias primas y las condiciones de su procesamiento, para esto existen dos vías para la obtención del alcohol en su aplicación en motor de combustión interna, ya sea por la vía química o biológica. En cuanto a su producción se prevé que a medida que la demanda de los alcoholes aumente, el costo será más competitivo. Los bioalcoholes pueden ser aplicados en motor a gasolina ya sea en mezcla o con aditivos, su empleo obtiene algunos beneficios como la generación de combustión más limpia produciendo menos CO y NOx, en el caso del motor diésel puede aplicarse el alcohol de diversas formas como fumigación, combustión dual, en mezcla de alcohol con diésel y como emulsión. Finalmente, los motores HCCI tienen una gran capacidad de quemar múltiples combustibles con diversas propiedades físicas y químicas, por lo que son candidatos naturales para aplicarlos con bioalcoholes.

Palabras clave— Alcohol, motor, métodos de obtención, emisiones

Abstract— The use of renewable biofuels can play a leading role in energy security, as well as in reducing dependence on oil, which is, by the way, running out. Among liquid biofuels is alcohol whose composition and properties will depend on the raw materials and the conditions of their processing, for this there are two ways to obtain alcohol in its application in internal combustion engine, either chemically or biologically. As for their production, it is expected that as demand for alcohols increases, the cost will become more competitive. Bioalcohols can be applied in gasoline engine either in mixture or with additives, its use obtains some benefits as the generation of cleaner combustion producing less CO and NOx, in the case of diesel engine alcohol can be applied in various ways as fumigation, dual combustion, in mixture of alcohol with diesel and as emulsion. Finally, HCCI engines have a great ability to burn multiple fuels with various physical and chemical properties, so they are natural candidates to apply them with bioalcohols.

Keywords— Alcohol, engine, production methods, emissions

I. INTRODUCCIÓN

El aumento del consumo y costo del combustible fósil, junto con el calentamiento global, han generado una preocupación, por lo que hace más factible el uso de combustibles alternativos en el futuro (Alenezi et al., 2013). La biomasa proporciona aproximadamente el 13% del suministro mundial de energía primaria y más del 75% de la energía renovable mundial (Hossain et al., 2013), de hecho, se estima alrededor del 10% al 50% del consumo mundial de energía será de biomasa para el 2050 (Kumar, et al., 2015). El uso de biocombustibles renovables desempeña un papel importante en la seguridad energética, al reducir la dependencia de los productos petrolíferos (Hossain et al., 2018), también se estima que el 30% de suministro mundial de energía para el 2050 se generará de bioenergía especialmente de biocombustibles líquidos (Guo et al., 2015), se prevé que los bioalcoholes podrían servir como combustibles para los motores diésel debido a los efectos económicos y ambientales benéficos (Ileri et al., 2016), el objetivo de esta investigación es analizar a los bioalcoholes en su producción y en la aplicación de diversos tipos de motores.

II. MÉTODOS DE OBTENCIÓN Y PRODUCCIÓN

La composición y propiedades del biocombustible dependen de la materia prima y de la condición de su procesamiento, más de 400 tipos de compuestos orgánicos pueden estar involucrados en

el biocombustible, entre los cuales se destacan los ácidos, aldehídos, cetonas, alcoholes, ésteres y fenoles (Leng et al., 2015). Los costos de producción de los biocombustibles pueden variar ampliamente, ya que dependen de varios factores, como su escala, la eficiencia del proceso, costos de materias primas, costo de capital, mano de obra y contabilidad de los co-productos (Awad et al., 2018), en la Figura 1 se presentan las dos vías para la producción de los bioalcoholes (Yusria et al., 2017, Kumar et al., 2017). Para mejorar la producción de biocombustibles, el desarrollo de catalizadores ha sido una de las áreas más estudiadas recientemente (Al-attab et al., 2018).



Fig. 1. Los combustibles alcohólicos se pueden obtener por medio de dos vías: a) químicamente, b) biológicamente, c) se pueden sintetizar y d) alcoholes aplicados a vehículos. Fuente: Elaboración propia.

El metanol se puede fabricar con carbón, gas natural, gas de horno de coque, hidrógeno y biomasa (Yilmaz et al., 2018). La baja emisión de gases de escape debido al menor punto de ebullición del metanol lo hace ver como un combustible más rápido para evaporar y esto es ventajoso para la combustión del motor y por lo tanto se reducen las emisiones de HC (hidrocarburos no quemados), (Awad et al., 2018), en la Figura 2 se presenta el proceso para producción del metanol.

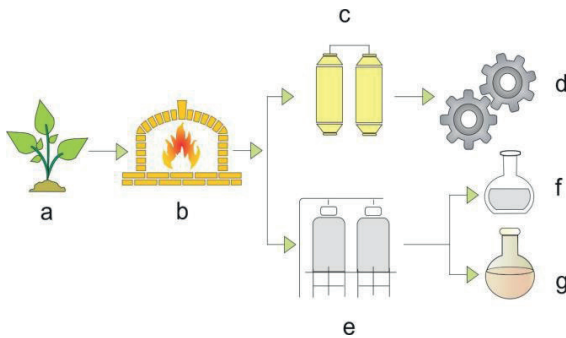


Fig. 2. Producción de metanol; a) biomasa, b) horno, c) gas pobre, d) energía mecánica, e) gas de síntesis, f) metanol y g) gasolinas.

Fuente: Elaboración propia

III. PRODUCCIÓN DE BIOALCOHOLES POR FERMENTACIÓN Y BIOSÍNTESIS

La biomasa y los residuos de diversos tipos, pueden ser utilizados para la producción de alcoholes, por lo que pueden considerarse como la próxima generación de combustibles alternativos que no afectan el mercado alimentario ni requerirán de tierras para su cultivo (Jeevahan et al., 2018), incluso si se utilizan microorganismos con cualquier biomasa residual para la producción de bioalcoholes se puede considerar más barato comparándolo con la producción del biodiesel (Jeevahan et al., 2017, Mumtaz et al., 2016). Desafortunadamente el uso de este combustible de alcohol no llega a ser utilizado ampliamente debido a su complejidad para producirlo, lo que puede generar altos costos (Hairuddin et al., 2014), por lo que para abatir algunos costos y complejidad en su producción se deben generar estrategias, como por ejemplo la elaboración de su producción localmente, con esto se puede reducir el costo del transporte del combustible además que puede ser aplicado en un motor inmediatamente

(Awad et al., 2018). Actualmente el etanol domina el mercado de bio-combustibles debido a su facilidad de fabricación y respeto al medio ambiente (Serrano- Ruiz et al., 2010), sin embargo, la mayoría del etanol es producido por gas de síntesis, que está compuesto de CO (monóxido de carbono) y H₂ (hidrógeno) (Zhen et al., 2015). Para la producción industrial del etanol existen dos vías principales, las cuales se presentan en la Figura 3.

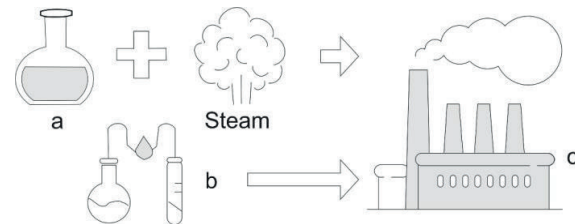


Fig. 3. Las dos vías para la producción industrial de etanol (Bae et al., 2017); a) reacción del etanol, b) fermentación alcohólica y c) producción industrial. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con Kleinert et al., (2008), analizaron una técnica de biorrefinería en la producción de etanol a partir de carbohidratos lignocelulosicos, en donde los autores encontraron que al pirolizar la lignina de la producción de etanol resulta de más alta calidad que la pirólisis líquida cruda (Hossain et al., 2013), en la Figura 4 se observa la producción de etanol por vía biorrefinería.

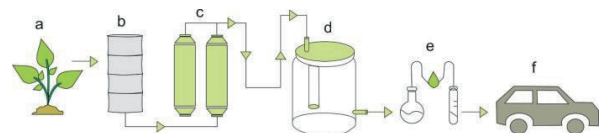


Fig. 4. Producción de etanol por vía biorrefinería: a) biomasa, b) pretratamiento, c) conversión enzimática en azúcares, d) fermentación de los azúcares, e) recuperación de materiales, f) etanol aplicado en vehículo.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del butanol se puede obtener del petróleo por medio de un proceso petroquímico o bien por biomasa a través de un proceso bioquímico (Örs et al., 2018), ambos tipos tienen las mismas propiedades químicas (Szwaja et al., 2010). Los alcoholes como el n-butanol y el 1-pentanol se pueden producir a través de residuos o materiales lignocelulosicos con técnicas avanzadas de producción (Mendiburu et al., 2014), se prevé que a la medida que la demanda de los alcoholes aumente, el costo será más competitivo (Yanai et al., 2017), una opción prometedora son los procesos de fermentación moderna que utilizan cepas genéticamente mejoradas como la clostridia E. Coli, líquidos iónicos, extracción de gases, extracción supercrítica y per-vaporación, todos estos procesos pueden ayudar a mejorar la obtención de los bioalcoholes (Chang et al., 2021), en la Figura 5 se presenta el proceso de obtención de alcoholes a través de la fermentación.

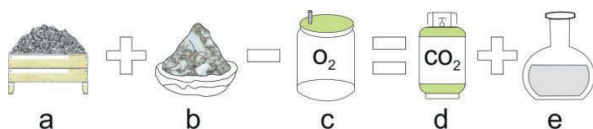


Fig. 5. Fermentación del alcohol: a) azúcar, b) levadura, c) oxígeno, d) dióxido de carbono, e) alcohol. Fuente: Elaboración propia.

IV. LOS ÉTERES BIOCOMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

Hace dos décadas se consideró que el DME (Dimetil éter) sería el combustible del siglo XXI desde la perspectiva de la conservación del medio ambiente y de la seguridad energética (Hegab et al., 2016). El DME es producido por la

conversión de varias materias primas tales como el gas natural, carbón, residuos de petróleo y materiales renovables (biomasa, residuos y productos agrícolas) (Bae et al., 2017), por lo general este biocombustible se genera de un gas de síntesis que primero se convierte en metanol, luego el metanol se deshidrata para ceder al DME (Semelsberger et al., 2006). También se puede desarrollar como un biocombustible sintético de segunda generación (bio-DME) el cual puede fabricarse a partir de biomasa lignocelulosica (Saxena et al., 2016). Actualmente la unión europea está considerando bio-DME por su potencial de biocombustible en el 2030, el grupo Volvo es el coordinador del proyecto bio-DME para el programa de la unidad europea (Saxena et al., 2016). También está el caso del MTBE (éter metil tert-butílico) el cual es un compuesto orgánico volátil fabricado por la reacción química del isobutileno y el metanol (Awad et al., 2018). Este es el combustible de éter más utilizado debido a su bajo costo, facilidad de producción y características favorables de transferencia y mezcla (Awad et al., 2018). El etanol y el MTBE obtienen como subproducto el aceite de fusel el cual se genera a través de la fermentación de algunos productos agrícolas los cuales tienen propiedades similares al combustible alcohólico, estas propiedades incluyen un alto número de octano, alto contenido de oxígeno y punto de ebullición (Awad et al., 2018). Finalmente se encuentra el DEE (éter dielítico) el cual se puede producir a partir del etanol a un costo aceptable y de naturaleza renovable, la

alta volatilidad de DEE evita el bloqueo de vapor en la línea de inyección del combustible (Hariharan et al., 2013).

V. BIOALCOHOLES APLICADOS EN EL MOTOR A GASOLINA (SI)

Proceso de combustión en motor SI

Aunque el etanol tiene buenas propiedades que ayudan a mejorar la combustión, el uso del etanol en motores SI es todavía limitado por su alto calor latente y baja densidad de energía (Ji et al., 2014). Además, el etanol tiene baja difusividad y muestra dificultad de ignición a baja temperatura (Shuofeng et al., 2010) lo cual causa una combustión incompleta (Al-Hamamre et al., 2013) y puede perjudicar el rendimiento del motor y las dimensiones (Shuofeng et al., 2010). De acuerdo con Park et al., (2017), señala que cuando el metanol aumenta, la presión y temperatura del cilindro disminuye, por lo que hace disminuir el NOx (Óxidos de nitrógeno) y el BTE (eficiencia térmica del freno) del motor, otro estudio presentado por Guillin-Estrada et al., (2021) evaluaron la combustión y rendimiento de la mezcla acetona-butanol-etanol y el gas hidroxilo (HHO), los resultados mostraron que la mezcla de los alcoholes reduce la presión en el cilindro y que el HHO disminuye el consumo de combustible, sin embargo en todos los casos el NOx se incrementó. Otro estudio sobre este tema lo presento Zhang et al., (2014) estudiaron la mezcla de n-butanol/gasolina con recirculación de gases de escape (EGR) en un motor DI (Inyección

directa) SI donde se analizaron los efectos de la detonación y se concluyó que los efectos adversos de n-butanol en la detonación podrán superarse con la aplicación de EGR.

Mezcla de alcohol con aditivos en motor SI

El etanol tiene un octanaje más alto que la gasolina, lo que permite al motor SI una mayor relación de compresión (Akansu et al., 2017). Debido a que el alcohol contiene hidroxilo, esto le permite tener una rápida combustión, además el etanol quema más limpio que la gasolina y produce menos CO y NOx (Akansu et al., 2017). En el experimento de Yousufuddin et al., (2009), analizaron el efecto del hidrógeno con el etanol y se obtuvieron las mejores condiciones operativas en una relación de compresión de 11:1 con una combinación de hidrógeno con etanol del 60% y con la adición de etanol del 20% se redujeron los valores del NOx hasta el 50%. Otro estudio similar lo realizó Greenwood et al., (2014), en donde analizaron la mezcla del 30% con hidrógeno y etanol, concluyeron que si puede reducirse el NOx en comparación con lo que hace la gasolina. En el trabajo de Melo et al., (2012), han reportado una reducción de CO con el aumento en la concentración de etanol mezclándolo con la gasolina, esto puede ser atribuido al mayor contenido de oxígeno de etanol. En estudios que aplican el metanol en sus experimentos, está el caso de Zhang et al., (2014a), en donde analizaron en un motor la mezcla de metanol con hidrógeno en condiciones

magras, encontraron que la eficiencia térmica del freno se mejoró después de la adición de hidrógeno. También se tiene el estudio de Shayan et al., (2011), en donde investigaron el impacto del metanol en mezclas de motor SI, 4 cilindros, sistema de inyección multipunto, motor Ford, modelo Zetec-E, los resultados muestran que, con el aumento del metanol, se incrementó la potencia, BTE y eficiencia volumétrica y además se reduce el BSFC (el consumo de combustible específico del freno), en el caso de las emisiones se genera una reducción de CO y HC pero se incrementa el CO₂ (dióxido de carbono) y NOx. De acuerdo con Raviteja et al., (2015), analizaron el rendimiento de un motor SI utilizando butanol, etanol, gasolina y H₂, la adición de hidrógeno al butanol-etanol mejora el proceso de combustión, amplía el rango de inflamabilidad de la mezcla y reduce las emisiones. Un estudio de una serie de mezclas la realizó Gautam et al., (2000), donde evaluó las mezclas de alcohol-gasolina, incluyendo metanol, etanol, propanol, butanol, pentanol y gasolina, demostró que cuanto más es el contenido de oxígeno en mezclas de alcohol y gasolina mejor es la resistencia al golpe y más rápida es la velocidad de combustión. En la investigación de Calam et al., (2015), analizaron las mezclas con el aceite de fusel, como resultado de su estudio se pudo aumentar el octanaje a medida que aumentaba la cantidad de fusel, lo cual es deseable ya que permite mejorar la eficiencia del motor, pero también aumenta el BSFC. Finalmente, una aplicación de mezcla de alcohol con

gasolina se presentó en el 2006 con la filial brasileña de Fiat la cual introdujo el combustible Fiat siena Tetra, un automóvil de 4 combustibles desarrollada por Fiat de Brasil, este automóvil puede funcionar con etanol al 100% con mezcla de gasolina y etanol al 25%, con pura gasolina y gas natural y puede cambiar de la mezcla de gasolina y etanol a gas natural comprimido automáticamente, dependiendo de la potencia requerida por las condiciones del camino (Saxena et al., 2016). La tecnología puede ayudar a mejorar el uso de biocombustibles está el caso del sistema de doble inyección gasolina-biocombustible en el motor de chispa en el cual está conformado de dos inyecciones por separado, el cual consiste en un inyector de puerto y un inyector directo, con la finalidad de lograr una mayor flexibilidad de combustible, considerando la demanda del motor y la disponibilidad del combustible para el vehículo (Yamasaki et al., 2013).

VI. BIOALCOHOLES APLICADOS EN EL MOTOR DIÉSEL (CI)

Los combustibles a base de alcohol han generado un gran interés en motor diésel en donde se han aplicado en numerosos estudios tales como el etanol, metanol, butanol, pentanol y el hexanol, siendo una alternativa atractiva para satisfacer la demanda energética y reducir las emisiones (Shahir et al., 2015, Zhang et al., 2016). Los alcoholes pueden usarse en motores CI ya sea a través de fumigación con alcohol en inyección de combustible dual, como mezcla de

alcohol con diésel y como emulsión alcohol-diésel (Satsangi et al., 2018).

Relación del porcentaje de dosis del bioalcohol en el motor CI

La utilización del metanol y el etanol como combustible alternativo en motores diésel ha sido ampliamente investigado y se ha demostrado desafortunadamente que su uso resulta en un deterioro en el rendimiento del motor, especialmente cuando la mezcla supera el 10%, en contraste el uso de alcoholes superiores como el n-butanol y el 1-pentanol, los cuales se pueden usar con mezclas de diésel y lograr hasta con un 40% en mezcla abasteciendo a los motores diésel (Atmanli et al., 2018). De acuerdo con el autor Campos-Fernández et al., (2012), señalaron que el 1-pentanol se puede agregar hasta con un 25% en volumen sin problemas en el rendimiento del motor logrando un aumento de BTE, pero generando también un ligero incremento de BSFC. En la Tabla 1 se muestra la porción óptima de la mezcla DEE en motor CI. También analizaron diferentes mezclas de 1-butanol/diésel y mezclas de 1-pentanol/diésel, en un motor diésel de inyección directa (Modelo Perkins AD 3-152) concluyeron que las mezclas de diésel recomendadas para el butanol son del 30% y un 25% para el 1-pentanol siendo este último la mejor alternativa para usarlo en el motor.

Tabla 1. Mezcla óptima de DEE con diésel en motor CI

Porción de DEE	Generación de emisiones	Desempeño del motor	Referencia
Hasta el 50%	HC y CO disminuyeron pero el NOx aumento	No hubo cambios en el motor	Lee et al., 2017
15%	Reducción de PM y NOx	Rendimiento óptimo del motor	Patil et al., 2015
5%	Reducción de CO y HC	Mejoro eficiencia del motor	Kapilan et al., 2008
15%	---	Aumento el BTE y redujo el BSFC	Sivalakshmi et al., 2013

Fuente: autores del artículo

1) Rendimiento y carga en el motor CI con bioalcohol

El aplicar alcoholes en un motor diésel puede ayudar a mejorar la combustión, es el caso de la adición del hexanol, el cual mejora la combustión por difusión logrando con esto aumentar el BTE, esto puede atribuirse a la menor cantidad de número de cetano del hexanol, lo que lleva a un mayor porcentaje de "constante de volumen" de combustión y menores pérdidas de calor en una combustión magra, según lo señala Zhang et al., (2016), en donde concluyeron que el hexanol es un alcohol con un gran potencial que podría mejorar el rendimiento del motor. No obstante, no todos son buenos resultados, está el caso del trabajo de Ferreira et al., (2013), donde estudiaron el etanol en el rendimiento del motor diésel y señalaron que en mezcla causo una reducción del consumo de combustible y en la eficiencia del motor. En el trabajo de Kumar

et al., (2018), investigaron el efecto del alcohol isopropílico y los resultados sugirieron una reducción de NOx y un ligero aumento de BTE, sin embargo, las emisiones de HC fueron más altas, pero se logró una disminución de CO₂, en otra investigación de Kumar et al., 2016, analizaron los efectos del n-octanol con mezclas de diésel y encontraron que la adición de n-octanol mejora el BTE y genera menores emisiones de humo, NOx, HC y CO. En el estudio de Campos-Fernández et al., 2012 y 2013, realizaron pruebas con un motor Perkins DI CI en mezcla de pentanol (10-25%) con diésel, los resultados mostraron que hubo una mejora en el BTE con el aumento en el contenido del pentanol, lo cual podría atribuirse a una mayor eficiencia de combustión, generando una tasa de liberación de calor rápida, mayor fase de combustión premezclada y reducción en las pérdidas de calor, esto último es debido a la presencia del oxígeno y al menor punto de ebullición del pentanol. Un análisis de varios alcoholes fue realizado por Atmanli et al., (2016), en donde analizaron el rendimiento del motor y las emisiones de un motor diésel alimentado con: diésel, biodiesel, propanol, n-butanol y 1-pentanol en un motor diésel de inyección indirecta, bajo una velocidad constante del motor de 1800 rpm en cuatro cargas del motor. Los resultados mostraron que la mezcla con propanol tenía mayor BSFC, mientras el n-butanol tuvo el mayor BTE, en el caso de las emisiones, todas las mezclas causaron un aumento de CO, mientras que las emisiones de HC se redujeron significativamente con n-butanol y con 1-pentanol, finalmente la

mezcla de 1-pentanol tuvo las menores emisiones de NOx. Otro trabajo similar lo desarrollaron Yilmaz et al., 2016, en donde investigaron el rendimiento y las emisiones en un motor de 4 cilindros de inyección indirecta motor diésel con una velocidad de giro de 1800 rpm y analizaron la mezcla (10%) de propanol, n-butanol y 1-pentanol, mezclado con biodiesel de aceite de desecho éster metílico, solo la mezcla de 1-pentanol tuvo un ligero aumento de BTE, el resto de los alcoholes tuvieron una reducción, en lo que respecta a las emisiones todos los combustibles mezclados tuvieron un menor contenido de CO y NOx en comparación con el aceite de desecho éster metílico, mientras que la mezcla de 1-pentanol tuvo las menores emisiones de HC de todos los combustibles probados. Finalmente, en el estudio de Kumar et al., 2016, examinaron el impacto de varias mezclas de alcohol con diésel en motor de un solo cilindro, de aspiración natural, velocidad constante (1500 rpm) motor diésel de inyección directa de 4 tiempos con 4 cargas, los combustibles analizados fueron mezclas de 30% de iso-butanol, n-pentanol, n-hexanol y n-octanol mezclados con diésel ultra-bajo en azufre puro (ULSP). Los resultados revelaron que la mezcla de iso-butanol tenía el mayor retraso de encendido, los picos más altos de presión y la duración más corta de la combustión. En lo que respecta a las emisiones observaron que en la mezcla de iso-butanol tenía el humo más bajo de opacidad y los niveles más bajos de NO y CO pero con un incremento de emisiones de HC en comparación a otros combustibles, el valor de HC más bajo lo registro la

mezcla de n-octanol. En la Tabla 2 se presenta el desempeño del motor aplicando butanol.

Tabla 2. Desempeño del motor CI con n-butanol en mezcla

Incremento del BSFC y BTE	Esto se atribuye a	Referencia
Si	Al menor número de cetano y mayor calor de vaporización	Siwale et al., 2013
Si	Al menor valor calorífico y presencia de O ₂ en combustible	Doğan et al., 2011
Si	Se redujo CO, NO _x y humo, mientras que HC aumento	Rakopoulos et al., 2010
No	Mejor eficiencia de combustión, aumento el BTE y redujo el BSFC	Campos-Fernández et al., 2012

Fuente: autores

El efecto de la inyección del bioalcohol en motor CI

El sistema de inyección del motor está diseñado al petrodiesel convencional, por lo que usar bioalcoholes agrega más complejidad al proceso, por lo que puede implicar un diseño de inyector, una bomba de alimentación para el bioalcohol y una alta presión de bomba de inyección modificada para el biocombustible (Park et al., 2014). De acuerdo con los estudios de Chen et al., (2017) y Li et al., (2016), investigaron los efectos de los parámetros de inyección de diésel en la combustión rápida para una combustión dual diésel-metanol. Los resultados experimentales mostraron que los parámetros de inyección del diésel afectan la fracción de combustión rápida en gran medida, por lo que aumenta a medida que la presión de inyección de diésel se incrementa. En el caso del estudio de Yao et al., 2010, analizaron en un motor diésel turbo-reforzado de inyección directa mezclas

con n-butanol con diésel. Reportaron un aumento de BSFC con mezclas de n-butanol y esto se le atribuye al bajo poder calorífico, sin embargo, se tuvo una reducción de hollín y CO, tal reducción se le atribuye a una duración de inyección relativamente más larga en comparación con el diésel, en la Tabla 3 se observa la relación de compresión óptima de acuerdo al tipo de alcohol aplicado.

Tabla 3. Análisis de la relación de compresión óptima en mezcla de alcohol con diésel

Tipo de bioalcohol	Relación de compresión	Se agregó H ₂	Aumento BTE	Referencia
Etanol	16:1	Si	Aumento en altas y moderadas cargas	Britto et al., 2014
Etanol	11:1	Si	Con H ₂ genera tasas de liberación más altas	Yousufuddin et al., 2008
n-butanol	18:2	No	Mejora la eficiencia en cargas parciales con reducción de NO _x y humo	Han et al., 2017
DEE	12 a 20	No	Mejora el BTE comparándolo con WPO/diésel	Ananthakumar et al., 2016

Fuente: autores del artículo

Los niveles de emisiones del motor CI

La formación de emisiones de CO en un motor diésel representa una combustión incompleta o imparcial, y si le agregamos que desafortunadamente los alcoholes superiores tienden en aumentar también la emisión de CO, esto último es debido a las pobres características de ignición y evaporación (Atmanli et al., 2016), ahora bien, el alcohol si llegará a generar una combustión completa por los altos contenidos de oxígeno que se generan, esto puede conducir a una reducción del CO, pero por lo mismo se podría incrementar el

CO₂ (Abedin et al., 2016). En la Tabla 4 se presenta el comportamiento del motor en base a la relación de golpe, ruido y vibración al momento de agregarle alcoholes.

Tabla 4. Niveles de vibración, ruido y golpe en motor por usar bioalcoholes

Tipo de alcohol	Tipo de problema	Causa que lo origina	Referencia
Alcohol inferior y de cadena corta	Fuga en el suministro de combustible	La baja viscosidad	Awad et al., 2018a
Mezcla de etanol con diésel	Incremento de vibración y golpe en el motor	La mezcla de 6% de etanol con diésel	Alisaraei et al., 2016
Mezcla de butanol con diésel	En cargas altas produjo más ruido/vibración	Fue en las mezclas entre 4.9% y 19.5% de butanol con diésel	Satsangi et al., 2018
Diversos alcoholes	Ruido y vibración	Motores con altas presiones de encendido y altas relaciones de compresión	Selim, 2001
Etanol	Vibración	Aumento en el retraso de ignición genera aumento en la presión del cilindro	Li et al., 2008
Etanol	Vibración	La presión en el cilindro y la distribución de las ondas de presión	Rakopoulos et al., 2008

Fuente: autores del artículo

En el caso de la emisión de PM (la materia particulada) esta se puede llegar a disminuir con la mezcla de alcohol, esta reducción se debe al alto contenido de oxígeno y a la ausencia de compuestos aromáticos (Abedin et al., 2016). En el caso de las emisiones de HC estas pueden aumentar cuando se utiliza la mezcla de alcohol, lo cual puede deberse al menor valor calorífico de alcohol que produce una evaporación lenta y una mezcla de aire-combustible más pobre. Por su parte la formación de NO_x depende en gran medida de

la temperatura del cilindro durante la combustión, como el alcohol tiene menor valor calorífico, emite una menor cantidad de calor durante el proceso de combustión por lo que reduce el NO_x (Abedin et al., 2016).

En el experimento de Zhang et al., 2016, analizaron mezclas de diésel-butanol y diésel-pentanol (10 y 20% en volumen de alcohol) en un motor diésel Yanmar L70AE de un cilindro y velocidad constante con 3 cargas en el motor. Los resultados señalan que la adición del alcohol con diésel reduce las emisiones de carbono elemental y PM, las mezclas con pentanol tuvieron los mejores resultados comparándolo con el butanol en términos de BSFC. En las Tablas 5 y 6 se presentan las emisiones que se generan al agregar butanol y pentanol respectivamente.

Tabla 5. Concentraciones de emisiones de mezcla de butanol con diésel comparándolo con solo diésel

Emisión que reduce	Emisión que aumenta	La causa de esto	Referencia
Humo y NO _x	CO y HC	Butanol (20%) genera aumento de BSFC y BTE	Atmanli et al., 2016a
Humo, CO y NO _x	HC	Aumento de n-butanol en mezcla	Rakopoulos et al., 2010
Humo y hollín	HC	El butanol lo genera	Chen et al., 2013, Zheng et al., 2015
Humo y NO _x	CO y HC	A mayor cantidad de butanol, mayor caída de humo	Yilmaz et al., 2014
Hollín	CO y NO _x	El humo se reduce en cuanto el butanol incrementa	Rakopoulos et al., 2010
NO _x	-	Con 40% de butanol, el BTE y el NO _x se redujeron con EGR	Chen et al., 2014
Humo, CO y NO _x	HC	A mayor cantidad de butanol, el BTE y el HC se incrementan	Rakopoulos et al., 2010a

Fuente: autores del artículo

Tabla 6. El pentanol en mezcla y sus emisiones

Emisiones que reduce	Emisiones que aumenta	La Causa de esto	Referencia mezcla (Abed)
Hollín	--	Mezclas de 20 y 40% de pentanol	Ma et al., 2017 de fumeste
--	HC	Con la adición de n- pentanol el HC aumenta	Kumar et al., 2016 ab fumig comp
Hollín y NOx	CO y HC	Mejor eficiencia sin EGR	Li et al., 2015 alcohol
NOx mixtos	CO y HC	Incremento el BSFC y la eficiencia	Yilmaz et al., 2017

Fuente: autores del artículo

En el estudio de Kumar et al., 2016 a,b, analizaron el efecto del n-octanol con el diésel, el estudio reveló que la mezcla de n- octanol exhibe mayor presión y una tasa de liberación de calor durante el premezclado, el BTE con n-octanol es más alto que con el combustible diésel y las emisiones de HC, CO y NOx también disminuyen cuando se incrementa la relación de la mezcla de n-octanol. Un estudio de diferentes alcoholes lo presenta Zhang et al., (2016 ab), analizaron el efecto de n- octanol, n-butanol, 2-etilhexanol e isobutanol y se mezclaron con el combustible diésel, los resultados muestran que todos los alcoholes con sus mezclas exhiben una reducción de las emisiones de humo en comparación con el combustible diésel, la velocidad de combustión laminar del n-octanol fue más alta, por lo que su combustión es más rápida, lo que resulta mejor para el motor. En el estudio de Youn et al., (2011), evaluaron la comparación entre el DME y el diésel, concluyeron que con el biocombustible DME la emisión de NOx es más alta que la del diésel con la misma carga del motor, sin embargo, con DME produce menos emisiones de

HC, humo y PM comparándolo con el diésel convencional. Otro estudio que analiza el DME lo presentaron Hou et al., (2014), donde analizaron las características de combustión en un motor diésel tubo- alimentado con DME y mezclas de biodiesel, el resultado muestra que con el aumento de DME las emisiones de NOx disminuyeron, pero las emisiones de HC y CO aumentaron ligeramente.

Fumigación del alcohol en motor CI

La fumigación del biocombustible se realiza inyectando en el colector de admisión la mezcla de aire fresco mediante el proceso de pulverización o carburación (Jamrozik et al., 2021), con esta mezcla se puede aplicar alcohol en el motor CI (Abedin et al., 2016). Para el modo de fumigación se puede requerir instrumentos adicionales como el carburador, el vaporizador y el inyector junto con una línea separada del tanque de combustible y controles para inyectar el alcohol en el colector de admisión. La fumigación puede suministrar una gran cantidad de aire y con esto se puede lograr una gran cantidad de energía (Chauhan et al., 2011). La ventaja que tiene la fumigación es la sustitución de hasta un 50% del suministro del diésel por el bioalcohol (Abedin et al., 2016), a pesar que el modo fumigación puede generar un aumento en el peso del vehículo, puede brindar la oportunidad de suministrar más energía al motor. En el modo de fumigación el BSFC aumenta, debido al mayor calor que evapora, lo que hace que disminuya la temperatura, y con esto requiera más

combustible, también puede reducir el BTE en el modo fumigación ya que, en bajas cargas, genera una gran cantidad de aire, lo que forma una pobre, como consecuencia se reduce la eficiencia (Abedin et al., 2016). Entre los alcoholes aplicados en el modo de fumigación se destaca el etanol hidratado y el butanol, siendo este último considerado como uno de los mejores para fumigación (Babu et al., 2017). En la Tabla 7 se observa el comportamiento del motor en modo de fumigación aplicando alcoholes.

Tabla 7. Comportamiento de los bioalcoholes en el modo de fumigación Referencia (Abedin et al., 2016)

Tipo de emisión	Causa	Se debe a:
HC	Aumenta	Debido a que se forma una capa de enfriamiento no quemado dentro del cilindro
PM	Reduce	Se logra una mejor utilización del aire
CO	Aumenta	La mezcla se queda atrapado en la capa de enfriamiento

Fuente: autores del artículo

De acuerdo con el estudio de Cheng et al., 2008, investigaron el efecto de la fumigación con metanol y biodiesel, en donde le agregaron un 10% de metanol a una velocidad constante de 1800 rpm, observaron que tanto el BSFC como el BTE aumentaron en comparación con el combustible diésel, y encontraron reducciones de NOx y CO₂, mientras que las emisiones de CO aumentaron en comparación con el diésel. Otro estudio de metanol lo realizaron Cheung et al., 2008, ellos analizaron el modo de fumigación del metanol

con biodiesel a velocidad constante de 1800 rpm, observaron que el BSFC aumentó conforme al incremento de fumigación y el BTE disminuyó mientras que el CO también causó un aumento. En el estudio de Abu-Qudais et al., 2000, encontraron que la fumigación con etanol al 20% genera un aumento en el BTE y también se logró una disminución del humo. Finalmente, en el estudio de Heisey et al., 1981, realizaron pruebas en un motor diésel de un cilindro, informaron que la fumigación con etanol logró un aumento en BTE cada vez que se incrementaba la carga del motor y también se observó una gran reducción de NOx cuando el alcohol fumigado era más del 15%, pero desafortunadamente el CO aumento.

VII. BIOALCOHOLES APLICADOS EN MOTOR HCCI

Los motores HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) pueden funcionar con cualquier combustible, siempre que el combustible pueda evaporarse y mezclarse con el aire antes de la ignición (Hairuddin et al., 2014). Los motores HCCI tienen una gran capacidad de quemar múltiples combustibles con diversas propiedades físicas y químicas (Bahlouli et al., 2014) y su capacidad de emplear una combinación de diferentes combustibles como las mezclas con diversos alcoholes. Sin embargo, estos motores tienen dos limitaciones, primero el control del tiempo de encendido y segundo su limitado rango operacional (Sun et al., 2021). Uno de los alcoholes que puede sustituir a la gasolina en los experimentos

con motores HCCI es el iso-octanol (Hairuddin et al., 2014). También se le puede adicionar hidrógeno, su mezcla con DME evita la ignición temprana y permite el funcionamiento del motor HCCI en cargas más altas (Hu et al., 2015). De acuerdo con Christensen et al., (1999), utilizaron varias mezclas de n-heptanol/iso-octanol y mezclas regulares de gasolina/diésel, para un motor HCCI de un solo cilindro, concluyeron que el motor HCCI con relación de compresión variable puede funcionar casi con cualquier combustible líquido. Otro análisis lo realizó Sudheesh et al., (2010), examinaron el uso de dietil éter (DEE) como mejorador de la ignición para la operación de biogás HCCI, señalaron que con la carga más alta (4.5 bar BMEP) en mezcla con biogás (80%), funciona adecuadamente en combustión HCCI y que la alta reactividad de DEE sirve como mejorador de ignición.

La falta de control directo sobre el tiempo de encendido del motor HCCI, ha generado entre los investigadores buscar soluciones, entre las alternativas es mezclar dos combustibles con diferentes propiedades con una gran variedad de proporciones en función de cada ciclo (Bahlouli et al., 2014). En este caso el estudio de Saxena et al., (2014), utilizaron una fuente de alimentación eléctrica externa aplicando un calefactor en el colector de admisión, aunque este enfoque fue exitoso con la combustión estable de etanol húmedo en un motor HCCI, esto requiere de una importante entrada de energía eléctrica

en el calentador. En otro estudio Saxena et al., (2012), remplazaron el calentador eléctrico, por un intercambiador de calor, de modo que se calentará el aire de admisión y así se logrará la combustión del etanol húmedo, con una combustión estable en el motor HCCI, obteniendo una mayor fracción de agua en etanol. En la investigación de Mack et al., 2016, analizaron el rendimiento del butanol en motor HCCI, el cual resultó mejor que el del etanol y la gasolina. En el estudio de Ma et al., (2008), realizaron un experimento de HCCI con 1-heptanol combinado con diésel en un motor CI de un solo cilindro y concluyeron que las emisiones de NOx disminuyeron drásticamente, en la Tabla 8 se puede observar, una relación de diferentes motores entre los que se destaca el motor RCCI, PCCI y Wankel con su interacción con los bioalcoholes.

Tabla 8. Motores PCCI, RCCI y Wankel alimentados con bioalcohol

Tipo de Alcohol	Tipo de motor	Ventajas	Desventajas	Referencia
Etanol, Butanol y n-heptanol	RCCI	El puerto de combustible inyectado influye en la combustión	No se tiene un buen control de combustión y genera emisiones	Qian et al., 2015
Butanol	PCCI	Tiene cierto control sobre la combustión y produce menos ruido	Se debe evitar tasas de aumento de presión	Pandian et al., 2018, Han et al., 2015
Etanol	Wankel	Mejora tanto la velocidad de la llama adiabática como el antigolpe	Las emisiones generadas	Amrouche et al., 2016
Butanol	Wankel	Aumento el BTE y redujo el HC, CO y CO ₂		Amrouche et al., 2016

Fuente: autores del artículo

VIII. CONCLUSIONES

Para la producción del alcohol como combustible requiere del desarrollo de procesos de fermentación modernas algunas opciones se encuentran en el empleo de cepas genéticamente mejoradas, por lo que la tecnología puede ayudar a mejorar el uso de los biocombustibles, otro caso sería la necesidad de desarrollar un sistema de doble inyección (inyecciones separadas) gasolina-biocombustible en el motor de chispa, o bien un sistema de inyección para el motor diésel que no sea solo para el petrodiesel como lo está actualmente, sino que esté diseñado en la aplicación de alcoholes lo que agregara más complejidad en su aplicación pero a su vez mejorará el empleo de los bioalcoholes, también está el caso del motor HCCI que puede funcionar casi con cualquier combustible líquido, mismo caso del motor RCCI inclusive hasta se podría considerar el motor PCCI o los motores rotativos. El alcohol y el éster como combustible en motor se proyecta como un fuerte candidato para ser aplicado en el transporte, y tanto el motor diésel como el motor HCCI son buenas opciones de aplicar alcoholes en mezcla con otros aditivos para mejorar el comportamiento del motor y reducir las emisiones.

IX. REFERENCIAS

- [24] Abedin, M. J., Imran, A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Shahir, S. A., Varman, M., & Ruhul, A. M. (2016). An overview on comparative engine performance and emission characteristics of different techniques involved in diesel engine as dual-fuel engine operation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 306-316. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.118>
- [25] Abu-Qudais M., Haddad O., Qudaisat M. (2000). The effect of alcohol fumigation on diesel engine performance and emissions. *Energy Convers Manag*; 41:389–99.
- [26] Akansu, Selahaddin & Tangöz, Selim & Kahraman, Nafiz & Ilhak, Mehmet & Açıkgöz, Salih. (2017). Experimental study of gasoline-ethanol-hydrogen blends combustion in an SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 10.1016/j.ijhydene.2017.07.014.
- [27] Al-attab, Khaled & Zainal, Z.A. & Enagi, Ibrahim. (2018). Liquid biofuels utilization for gas turbines: A. review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 90. 10.1016/j.rser.2018.03.006.
- [28] Alenezi R., Santos R., Raymahasay S., Leeke G. (2013). Improved biodiesel manufacture at low temperature and short reaction time. *Renew Energy*, 53:242–8.
- [29] Al-Hamamre Z., Yamin J. (2013). The effect of hydrogen addition on pre-mixed laminar acetylenehydrogen-air and ethanolhydrogen-air flames. *Int J Hydrogen Energy*, 38:7499e509.
- [30] Alisaraei AT, Asl AR. (2016). The effect of added ethanol to diesel fuel on

- performance, vibration, combustion and knocking of a CI engine. *Fuel*, 185:718–33.
- [31] Ananthakumar S., Jayabal S., Thirumal P. (2016). Investigation on performance, emission and combustion characteristics of variable compression engine fuelled with diesel, waste plastics oil blends. *J Braz Soc Mech Sci Eng*. <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-016-0518-6>.
- [32] Atmanli A. (2016). Comparative analyses of dieselwaste oil biodiesel and propanol, n-butanol or 1-pentanol blends in a diesel engine. *Fuel* 176, 209- 215.
- [33] Atmanli A., Erol Ileri, Nadir Yilmaz. (2016a). Optimization of diesel-butanolvegetable oil blend ratios based on engine operating parameters, *Energy* 96 (1) 569-580.
- [34] Atmanli A. & Yilmaz, Nadir. (2018). A comparative analysis of n-butanol/diesel and 1-pentanol/diesel blends in a compression ignition engine. *Fuel*. 234. 161-169. [10.1016/j.fuel.2018.07.015](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.015).
- [35] Amrouche F., Erickson P.A., Park J.W., Varnhagen S. (2016). An experimental evaluation of ultra-lean burn capability of a hydrogen-enriched ethanol-fuelled Wankel engine at full load condition. *Int J Hydrogen Energy*, 41:19231e42. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.267>.
- [36] Awad O.I., R. Mamat, Obed M. Ali, N.A.C. Sidik, T. Yusaf, K. Kadirgama, Maurice Kettner. (2018). Alcohol and ether as alternative fuels in spark ignition engine: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 82, Part 3, Pages 2586-2605, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.074>.
- [37] Awad, Omar & Mamat, Rizalman & Ibrahim, Thamir & Thaeer Hammid, Ali & Humada, Ali Mahmood. (2018a). Overview of the oxygenated fuels in spark ignition engine: Environmental and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 91. [10.1016/j.rser.2018.03.107](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.107).
- [38] Bae C., Jaeheun Kim. (2017). Alternative fuels for internal combustion engines, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 36, Issue 3, Pages 3389-3413, ISSN 1540-7489, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.09.009>.
- [39] Bahlouli, K. & Atikol, Ugur & Saray, R. & Mohammadi, Vahid. (2014). A reduced mechanism for predicting the ignition timing of a fuel blend of natural-gas and n-heptane in HCCI engine. *Energy Conversion and Management*. 79. 85–96. [10.1016/j.enconman.2013.12.005](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.005).
- [40] Britto RF, Jr., Martins CA. (2014). Experimental analysis of a diesel engine operating in Diesel- Ethanol Dual-Fuel mode. *Fuel*, 134:140–50.

- [41] Babu V.M., Madhu Murthy K., Amba Prasad Rao G. (2017). Butanol and pentanol: The promising biofuels for CI engines – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 78, Pages 1068-1088, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.038>.
- [42] Calam A., Solmaz H, Uyumaz A., Polat S., Yilmaz E., İçingür Y. (2015). Investigation of usability of the fusel oil in a single cylinder spark ignition engine. *J Energy Inst*, 88:258–65.
- [43] Campos-Fernández J., Arnal J.M., Gómez J., Dorado MP. (2012). A comparison of performance of higher alcohols/diesel fuel blends in a diesel engine. *Appl Energy*, 95:267–75.
- [44] Campos-Fernández J., Arnal J.M., Gomez J., Lacalle N., Dorado M.P. (2013). Performance tests of a diesel engine fueled with pentanol/diesel fuel blends. *Fuel*, 107:866–72.
- [45] Chang D., Islam Z., Zheng J., Zhao J., Cui X., Yu Z. (2021). Inhibitor tolerance and bioethanol fermentability of levoglucosan-utilizing *Escherichia coli* were enhanced by overexpression of stress-responsive gene *ycfR*: The proteomics-guided metabolic engineering, *Synthetic and Systems Biotechnology*, Volume 6, Issue 4, Pages 384-395, ISSN 2405-805X, <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2021.11.003>.
- [46] Chauhan B.S., Kumar N., Pal S.S., Du Jun Y. (2011). Experimental studies on fumigation of ethanol in a small capacity diesel engine. *Energy*, 36:1030–8.
- [47] Chen Z., J.P. Liu, Z.Y. Han, B. Du, Y. Liu, C.F. Lee. (2013). Study on performance and emissions of a passenger-car diesel engine fueled with butanol-diesel blends, *Energy* 55; 638–646.
- [48] Chen Z., Wu Z., Liu J., Lee C. (2014). Combustion and emissions characteristics of high nbutanol/diesel ratio blend in a heavy-duty diesel engine and EGR impact. *Energy Convers Manage*, 78:787–95.
- [49] Chen, Z.F., Yao, C.D., Yao, A.R., et al., (2017). The impact of methanol injecting position on cylinder-to-cylinder variation in a diesel methanol dual fuel engine. *Fuel* 191, 150-163.
- [50] Cheng C.H., Cheung C.S., Chan T.L., Lee S.C., Yao C.D., Tsang K.S. (2008). Comparison of emissions of a direct injection diesel engine operating on biodiesel with emulsified and fumigated methanol. *Fuel*, 87:1870–9.
- [51] Cheung C.S., Cheng C., Chan T.L., Lee S.C., Yao C., Tsang K.S. (2008). Emissions characteristics of a diesel engine fueled with biodiesel and fumigation methanol. *Energy Fuels*, 22:906–14.
- [52] Christensen M., Hultqvist A., Johansson B. (1999). Demonstrating the multi fuel capability of a homogeneous charge compression ignition engine with

- variable compression ratio. SAE paper 1999-01- 3679.
- [53] Doğan O. (2011). The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 90(7):2467–72.
- [54] Ferreira V.P, J. Martins, E.A. Torres, L.M. Pepe, M.S.R. De Souza J. (2013). Performance and emissions analysis of additional ethanol injection on a diesel engine powered with a blend of diesel- biodiesel, *Energy for Sustainable Development* 17; 649-657.
- [55] Gautam M, Martin D.W. (2000). Combustion characteristics of higher alcohol/gasolina blends. *Proc Inst Mech Eng*; 214A:497-511.
- [56] Guillin-Estrada W., Maestre-Cambronel D., Bula- Silvera A., Gonzalez-Quiroga A., Duarte-Forero J. (2021). Combustion and Performance Evaluation of a Spark Ignition Engine Operating with Acetone– Butanol–Ethanol and Hydroxy. *Applied Sciences*; 11(11):5282. <https://doi.org/10.3390/app11115282>
- [57] Greenwood J.B., Erickson P.A., Hwang J., Jordan E.A. (2014). Experimental results of hydrogen enrichment of ethanol in an ultra-lean internal combustion engine. *Int J Hydrog Energy*, 39:12980–90.
- [58] Guo M., Song W., Buhain J. (2015). Bioenergy and biofuels: history status and perspective. *Renew Sustain Energy Rev.* 42:712–25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>.
- [59] Hairuddin A.A., Talal Yusaf, Andrew P. Wandel. (2014). A review of hydrogen and natural gas addition in diesel HCCI engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 32, Pages 739- 761, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.018>.
- [60] Han X.Y, Z.Y. Yang, M.P. Wang, J. Tjong, M. Zheng. (2017). Clean combustion of n-butanol as a next generation biofuel for diesel engines, *Appl. Energy*. 128; 347–359.
- [61] Hariharan S., Murugan S., Nagarajan G. (2013). Effect of diethyl ether on Tyre pyrolysis oil fueled diesel engine. *Fuel*; 104:109–15.
- [62] Hegab, Abdelrahman & La Rocca, Antonino & Shayler, Paul. (2016). Towards keeping diesel fuel supply and demand in balance: Dual-fuelling of diesel engines with natural gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 70. [10.1016/j.rser.2016.11.249](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.249).
- [63] Heisey J.B., Lestz S.S. (1981). Aqueous Alcohol Fumigation of a Single-Cylinder DI Diesel Engine. *SAE Technical Paper* 811208; <https://doi.org/10.4271/811208>.
- [64] Hossain, A. & Davies, Philip. (2013). Pyrolysis liquids and gases as alternative fuels in internal combustion engines – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 21. 165-189. [10.1016/j.rser.2012.12.031](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.031).

- [65] Hossain, M.d. Farhad, Rainey, Thomas, Ristovski, Zoran, Brown, Richard. (2018). Performance and exhaust emissions of diesel engines using microalgae FAME and the prospects for microalgae HTL biocrude Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (Part 3), pp.4269-4278.
- [66] Hou, J., Wen, Z., Jiang, Z., et al., (2014). Study on combustion and emissions of a turbocharged compression ignition engine fueled with dimethyl ether and biodiesel blends. Journal of the Energy Institute 87 (2), 102-113.
- [67] Hu E., Chen Y., Cheng Y., Meng X., Yu H., Huang Z. (2015). "Study on the effect of hydrogen addition to dimethyl ether homogeneous charge compression ignition combustion engine. J Renew Sust Energy, 7:063121.
- [68] Ileri E., Atmanli A., Yilmaz N. (2016). Comparative analyses of n-butanol-rapeseed oil-diesel blend with biodiesel, diesel and biodiesel-diesel fuels in a turbocharged direct injection diesel engine. J Energy Inst. 89:586-93.
- [69] Jeevahan, J., Mageshwaran, G., Joseph, G.B., Durai Raj, R.B., Kannan, R.T., (2017). Various strategies for reducing Nox emissions of biodiesel fuel used in conventional diesel engines: a review. Chem. Eng. Commun. 204 (10), 1202-1223.
- [70] Jamrozik, A.; Tutak, W.; Grab-Rogaliński, K. (2021). Combustion Stability, Performance and Emission Characteristics of a CI Engine Fueled with Diesel/n-Butanol Blends. Energies, 14, 2817. <https://doi.org/10.3390/en14102817>
- [71] Jeevahan, Jeya & R. B., Durairaj & Govindaraj, Mageshwaran. (2018). Experimental Investigation of the suitability of 1-Butanol Blended with Biodiesel as an Alternative Biofuel in Diesel Engines. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 15. 10.1016/j.bcab.2018.05.013.
- [72] Ji C., Liu X., Wang S., Gao B., Yang J. (2014). A laminar burning velocity correlation for combustion simulation of hydrogen-enriched ethanol engines. Fuel, 133:139e42.
- [73] Kapilan N., Mohanan P., Reddy R. (2008). Performance and Emission Studies of Diesel Engine Using Diethyl Ether as Oxygenated Fuel Additive. SAE Technical Paper 2008-01-2466, doi:10.4271/2008-01-2466.
- [74] Kleinert M., Barth T. (2008). Towards a lignin-cellulosic biorefinery: direct one-step conversion of lignin to hydrogen-enriched biofuel. Energy & Fuels, 22(2):1371-9.
- [75] Kumar A., Kumar N., Baredar P., Shukla A. (2015). A review of biomass energy resources, potential, conversion, and policy in India Renew. Sustain. Energy Rev., 45, pp. 530-539
- [76] Kumar A.S., Jayabal S., Thirumal P. (2016). Investigation on performance,

- emission and combustion characteristics of variable compression engine fuelled with diesel, waste plastics oil blends. *J Braz Soc Mech Sci Eng.* <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-016-0518-6>.
- [77] Kumar, B.R., Saravanan, S., Rana, D., Nagendran, A. (2016a). A comparative analysis on combustion and emissions of some next generation higher- alcohol/diesel blends in a direct-injection diesel engine. *Energy Convers. Manag.* 119, 246-256.
- [78] Kumar, B.R., Saravanan, S., Rana, D., Anish, V., Nagendran, A. (2016b). Effect of a sustainable biofuelen-octanoleon the combustion, performance and emissions of a DI diesel engine under naturally aspirated and exhaust gas recirculation (EGR) modes. *Energy Convers. Manag.* 118, 275e286.
- [79] Kumar B.R, S. Saravanan. (2017). Use of higher alcohol biofuels in diesel engines: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60; 84-115.
- [80] Kumar, A. Naresh & Raju, K. & Srinivas Kishore, Pisipaty & Narayana, K. (2018). Some Experimental Studies on effect of Exhaust-Gas Recirculation on Performance and Emission characteristics of a Compression-Ignition engine fuelled with Diesel and Lemon-peel oil Blends. *Materials Today: Proceedings.* 5. 6138-6148. [10.1016/j.matpr.2017.12.220](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.220).
- [81] Lee S., T.Y. Kim. (2017). Performance and emission characteristics of a DI diesel engine operated with diesel/ DEE blended fuel, *Appl. Therm. Eng.* 121; 454-461.
- [82] Leng L., Yuan X., Chen X., Huang H., Wang H., Li H., et al., (2015). Characterization of liquefaction bio-oil from sewage sludge and its solubilization in diésel microemulsion. *Energy*, 82:218e28. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.032>.
- [83] Li, W., Ren, Y., Wang, XB. (2008). Combustion characteristics of a compression ignition engine fuelled with diesel-ethanol blends. *Proc Inst Mech Eng Part D J Automobile Eng*, 222: 265-274
- [84] Li L., Wang J., Wang Z., Liu H. (2015). Combustion and emissions of compression ignition in a direct injection diesel engine fueled with pentanol. *Energy*, 80:575-81.
- [85] Li, G., Zhang, C.H., Li, Y.Y., et al., (2016). Effects of diesel injection parameters on the rapid combustion and emissions of anHD common-rail diesel engine fueled with diesel-methanoldual-fuel. *Applied Thermal Engineering* 108, 1214e1225.
- [86] Ma J, Lü Xingcai, Ji Libin, Huang Zhen. (2008). An experimental study of HCCI-DI combustion and emissions in a diesel engine with dual fuel. *Int J Therm Sci*; 47:1235-42.
- [87] Ma Y., Huang S., Huang R., Zhang Y., Xu S. (2017). Ignition and combustion characteristics of n- pentanol-diesel

- blends in a constant volume chamber. *Appl Energy*; 185:519–30.
- [88] Mack JH., Schuler D., Butt RH., Dibble RW. (2016). Experimental investigation of butanol isomer combustion in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines. *Appl Energy*; 165:612–26.
- [89] Melo T.C.C., G.B. MacHado, C.R.P. Belchior, M.J. Colao, J.E.M. Barros, E.J. De Oliveira, D.G. De Oliveira. (2012). Hydrous ethanol-gasoline blends - combustion and emission investigations on a flex-fuel engine, *Fuel* 97, 796–804. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.018>.
- [90] Mendiburu A.Z., Justo J. Roberts, João A. Carvalho, José L. Silveira. (2014). Thermodynamic analysis and comparison of downdraft gasifiers integrated with gas turbine, spark and compression ignition engines for distributed power generation, *Applied Thermal Engineering*, Volume 66, Issues 1–2, Pages 290-297, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.027>
- [91] Mumtaz, M.W., Mukhtar, H., Dilawer, U.A., Hussain, S.M., Hussain, M., Iqbal, M. (2016). Biodiesel production from *Eruca sativa* oil catalyzed by Novozyme-435 and lipase. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.bcab.2016.01.003>.
- [92] Örs, İlker & Sarikoc, Selcuk & Atabani (A.E. Atabani), Abdulaziz & Ünal, Sebahattin & Akansu, Selahaddin. (2018). The effects on performance, combustion and emission characteristics of DICl engine fuelled with TiO₂ nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends. *Fuel*. 234. 188. [10.1016/j.fuel.2018.07.024](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.024).
- [93] Pandian, Murugesu & Krishnasamy, Anand. (2018). Comparison of Different Low Temperature Combustion Strategies in a Light Duty Air Cooled Diesel Engine. *Applied Thermal Engineering*. 142. [10.1016/j.applthermaleng.2018.07.047](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.047).
- [94] Park S.H., Lee C.S. (2014). Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel. *Energy Convers Manage*; 86:848–63.
- [95] Park, S., Cho, J., Park, J., et al., (2017). Numerical study of the performance and NO_x emission of a diesel-methanol dual-fuel engine using multi-objective Pareto optimization. *Energy* 124, 272-283.
- [96] Patil K.R., S. S. Thipse. (2015). Experimental investigation of CI engine combustion, performance and emissions in DEE–kerosene–diesel blends of high DEE concentration, *Energy Convers. Manage*. 89; 396–408.
- [97] Qian Y., L. Ouyang, X. Wang, L. Zhu, X. Lu. (2015). Experimental studies on combustion and emissions of RCCI

- fueled with n-heptane/alcohols fuels, *Fuel* 162; 239–250.
- [98] Rakopoloulos, D.C., Rakopoloulos, C.D., Kakaras, E.C. (2008). Effects of ethanol–diesel fuel blends on the performance and exhaust emissions of heavy duty DI diesel engine. *Energy Convers Manage*; 49: 3155– 3162.
- [99] Rakopoulos, D.C., Rakopoulos, C.D., Giakoumis, E.G., Dimaratos, A.M., & Kyritsis, D.C. (2010). Effects of butanol–diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 51(10), 1989–1997. doi:10.1016/j.enconman.2010.02.032
- [100] Rakopoulos D.C., Rakopoulos C.D., Hountalas D.T., Kakaras E.C., Giakoumis E.G., Papagiannakis R.G. (2010a). Investigation of the performance and emissions of bus engine operating on butanol/diesel fuel blends. *Fuel*; 89(10):2781–90.
- [101] Raviteja S., Kumar G.N. (2015). Effect of hydrogen addition on the performance and emission parameters of an SI engine fueled with butanol blends at stoichiometric conditions. *Int J Hydrogen Energy*, 40(30):9563e9.
- [102] Saxena S., Schneider S., Aceves S., Dibble R. (2012). Wet ethanol in HCCI engines with exhaust heat recovery to improve the energy balance of ethanol fuels. *Appl Energy*. 98:448–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.007>.
- [103] Saxena S., David Vuilleumier, Darko Kozarac, Martin Kriek, Robert Dibble, Salvador Aceves. (2014). Optimal operating conditions for wet ethanol in a HCCI engine using exhaust gas heat recovery, *Applied Energy*, Volume 116, Pages 269-277, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.033>.
- [104] Saxena P., Alpna Singh, Niharika, Nidhi Chaudhary, Neha Arora. (2016). Twenty first century vehicle- based on non-coventional sources with advanced features. *International Research Journal of Engineering and Technology*, Volume:03, Issue:04, 2748-2753.
- [105] Satsangi D.P., Nachiketa Tiwari. (2018). Experimental investigation on combustion, noise, vibrations, performance and emissions characteristics of diesel/n-butanol blends driven genset engine, *Fuel*, Volume 221, Pages 44-60, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.060>.
- [106] Semelsberger T.A., Borup R.L., Greene H.L. (2006). Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. *J Power Sources*, 156:497–511.
- [107] Selim, MYE. (2001). Características presión-tiempo en motores diesel alimentados con gas natural. *Energía Renovable*, 22: 473 – 489.
- [108] Serrano-Ruiz J.C., West R.M., Dumesic J. (2010). Catalytic conversion of

- renewable biomass resources to fuels and chemicals. *Annu Rev Chem Biomol Eng.*1(1):79–100.
- [109] Shahir SA, Masjuki HH, Kalam MA, Imran A, Ashraful AM. (2015). Performance and emission assessment of diesel-biodiesel-ethanol/bioethanol blend as a fuel in diésel engines: a review. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 48(Supplement C):62–78.
- [110] Shayan B.S., Seyedpour S.M., Omni F., Moosavy S.H., Alizadeh M. (2011). Impact of methanolegasoline fuel blends on the performance and exhaust emission of a SI engine. *Int J Automot Eng*, 1.
- [111] Shuofeng W., Changwei Ji, Zhang Bo. (2010). Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark-ignited ethanol engine at idle and stoichiometric conditions. *Int J Hydrogen Energy*, 35:9205e13.
- [112] Sivalakshmi S., Balusamy T. (2013). Effect of biodiesel and its blends with diethyl ether on the combustion, performance and emissions from a diesel engine. *Fuel*; 106:106–10.
- [113] Siwale L, Kristóf L, Adam T, Bereczky A, Penninger A, Mbarawa M, et al., (2013). Performance characteristics of n-butanol-diesel fuel blend fired in a turbo-charged compression ignition engine. *J Power Energy Eng*, 1(05):77.
- [114] Sun B., Wang H., Yan K., Zhang R. (2021). The research and analysis of Homogeneous Charge Compression Ignition Engine. *Journal of Physics: Conference Series*, 2125 (2021) 012016, 1-12, doi:10.1088/1742-6596/2125/1/012016.
- [115] Sudheesh K., Mallikarjuna J.M. (2010). Diethyl ether as an igniton improver for biogás homogeneous compression ignition (HCCI) operation- an experimental investigation. *Energy*; 35:3614e22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.052>.
- [116] Szwaja S., Naber J.D. (2010). Combustion of n- butanol in a spark-ignition IC engine. *Fuel*; 89:1573– 82.
- [117] Han X., Ming Zheng, Jimi S. Tjong, Tie Li. (2015). Suitability study of n-butanol for enabling PCCI and HCCI and RCCI combustion on a high compression-ratio diésel engine. No. 2015-01-1816, SAE Technical Paper.
- [118] Yamasaki, Yudai & Kanno, Masanobu & Suzuki, Yoshitaka & Kaneko, Shigehiko. (2013). "Development of an engine control system using city gas and biogas fuel mixture," *Applied Energy*, Elsevier, vol. 101(C), pages 465-474.
- [119] Yanai, Tadanori & Bryden, Geraint & Dev, Shouvik & Reader, Graham & Zheng, Ming. (2017). Investigation of ignition characteristics and performance of a neat n-butanol direct injection compression ignition

- engine at low load. *Fuel*. 208. 137-148. 10.1016/j.fuel.2017.06.096.
- [120] Yao M., Wang H., Zheng Z., Yue Y. (2010). Experimental study of n-butanol additive and multi- injection on HD diesel engine performance and emissions. *Fuel*; 89(9):2191–201.
- [121] Yilmaz N., Atmanlı A. (2017). Experimental evaluation of a diesel engine running on the blends of diesel and pentanol as a next generation higher alcohol. *Fuel*; 210:75–82.
- [122] Yilmaz N., Ileri E., Atmanli A. (2016). Performance of biodiesel/higher alcohols blends in a diesel engine. *Int J Energy Res*; 40:1134e43.
- [123] Yilmaz N., Vigil F.M., Benlil K., Davis S.M., Calva A. (2014). Effect of biodiesel-butanol fuel blends on emissions and performance characteristics of a diesel engine. *Fuel*; 135:46–50.
- [124] Yilmaz, İlker & Taştan, Murat. (2018). Investigation of hydrogen addition to methanol-gasoline blends in an SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 43. 10.1016/j.ijhydene.2018.07.088.
- [125] Youn, I.M., Su, H.P., Roh, H.G., et al., (2011). Investigation on the fuel spray and emission reduction characteristics for dimethyl ether (DME) fueled multi-cylinder diesel engine with common-rail injection system. *Fuel Processing Technology* 92 (7), 1280-1287.
- [126] Yousufuddin S., Masood M. (2009). Effect of ignition timing and compression ratio on the performance of a hydrogen-ethanol fuelled engine. *Int J Hydrogen Energy*; 34:6945e50.
- [127] Yousufuddin S., Mehdi S.N., Masood M. (2008). Performance and combustion characteristics of a hydrogen-ethanol-fuelled engine. *Energy Fuels*; 22:3355–62.
- [128] Yusria I.M, R. Mamata, G. Najafib, A. Razmana, O.I. Awada, et al., (2017). Alcohol based automotive fuels from first four alcohol family in compression and spark ignition engine: a review on engine performance and exhaust emissions, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 77;169–181.
- [129] Zhang Z.J., Wang T.Y., Jia M., Wei Q., Meng X.Z., Shu G.Q. (2014). Combustion and particle number emissions of a direct injection spark ignition engine operating on ethanol/gasoline and n-butanol/gasoline blends with exhaust gas recirculation. *Fuel*; 130:177e88.
- [130] Zhang B., Ji C., Wang S., Liu X. (2014a). Combustion and emissions characteristics of a spark-ignition engine fueled with hydrogen-methanol blends under lean and various loads conditions. *Energy*; 74:829– 35.
- [131] Zhang Z-H, Balasubramanian R. (2016). Investigation of particulate emission characteristics of a diesel engine

fueled with higher alcohols/biodiesel blends. Appl Energy; 163:71–80.

emissions from a diesel engine. Fuel; 176:40–7.

[132] Zhang T., Nilsson L.J., Björkholtz C., Munch K., Denbratt I. (2016a). Effect of using butanol and octanol isomers on engine performance of steady state and cold start ability in different types of Diesel engines. Fuel; 184:708–17.

[134] Zhen, Xudong & Wang, Yang. (2015). "An overview of methanol as an internal combustion engine fuel, " Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 52(C), pages 477-493.

[133] Zhang Z.H., Chua S.M., Balasubramanian R. (2016b). Comparative evaluation of the effect of butanol–diesel and pentanol–diesel blends on carbonaceous particulate composition and particle number

[135] Zheng Z.Q. C.L. Li, H.F. Liu, Y. Zhang, X.F. Zhong. (2015). Experimental study on dieselconventional and low temperature combustion by fueling four isomers of butanol, Fuel 141;109–119.