Ingenio Magno
ISSN 2145-9282 - ISSN 2422-2399 (En línea)
UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A

REVISTA INGENIO MAGNO ISSN digital 2422-2399, Volumen 14 No 1, año 2023

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 Martinez Torres[a]

[a]Universidad Politécnica de Victoria, 87138 Cd Victoria, Tamps, México.
hriojasg@upv.edu.mx, lbortoni@upv.edu.mx, jmartinezt@upv.edu.mx

[b]Grupo 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. INTRODUCCION

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).

Figura 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, hidrogeno 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.

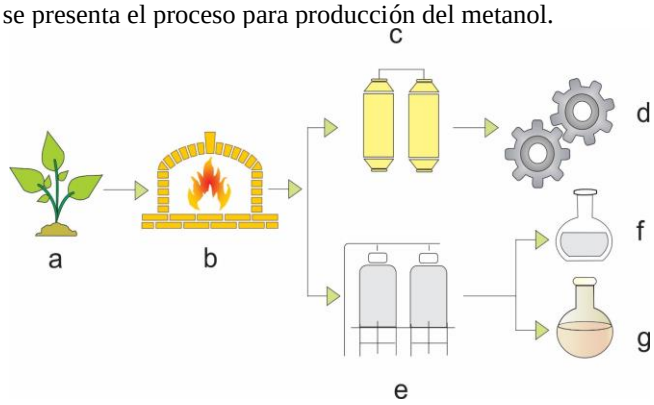

Figura 2. Producción de metanol; a) biomasa, b) horno, c) gas pobre, d) energía mecánica, e) gas de síntesis, f) metanol y g) gasolinas. Fuente: Elaboración propia

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 biocombustibles 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 H_2 (hidrogeno) (Zhen et al 2015). Para la producción industrial del etanol existen dos vías principales, las cuales se presentan en la Figura 3.

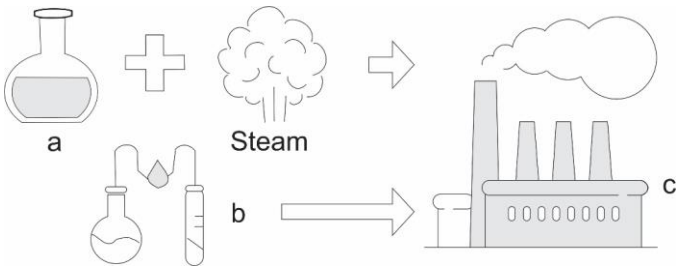

Figura 3. Las dos vías para la producción industrial de etanol (Bae et al 2017); a) reacción del etanol, b) fermentación alcohólica y c) producción industrial. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con Kleinert et al (2008), analizaron una técnica de biorrefineria 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 pirolisis liquida cruda (Hossain et al 2013), en la Figura 4 se observa la producción de etanol por vía biorrefinería.

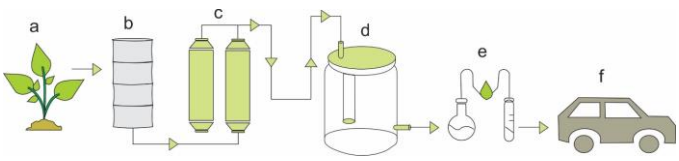

Figura 4. Producción de etanol por vía biorrefinería: a) biomasa, b) pretratamiento, c) conversión enzimática en azucares, d) fermentación de los azucares, e) recuperación de materiales, f) etanol aplicado en vehículo. Fuente: Elaboración propia

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, liquidos 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.

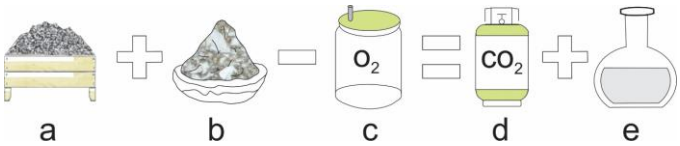

Figura 5. Fermentación del alcohol: a) azúcar, b) levadura, c) oxigeno, d) dióxido de carbono, e) alcohol. Fuente: Elaboración propia

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 dielitico) 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 hidroxi (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 hidrogeno con el etanol y se obtuvieron las mejores condiciones operativas en una relación de compresión de 11:1 con una combinación de hidrogeno 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 hidrogeno 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 oxigeno 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 hidrogeno en condiciones magras, encontraron que la eficiencia térmica del freno se mejoró después de la adición de hidrogeno. 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 CO_2 (dióxido de carbono) y NOx. De acuerdo con Raviteja et al (2015), analizaron el

rendimiento de un motor SI utilizando butanol, etanol, gasolina y H_2, la adición de hidrogeno al butanol-etanol mejora el proceso de combustión, amplia el rango de inflamabilidad de la mezcla y reduce las emisiones. Un estudio de una serie de mezclas la realizo 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 (Atmanlı 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 optima 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 optima 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

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 perdidas 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 isopropilico 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 CO_2, 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 Perkings 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 perdidas 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 tenia 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-petanol 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, NOx 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 petrodiésel 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 optima de acuerdo al tipo de alcohol aplicado.

Tabla 3.
Análisis de la relación de compresión optima 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	Mejoro la eficiencia en cargas parciales con reducción de NOx y humo	Han et al 2017
DEE	12 a 20	No	Mejoro 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 oxigeno que se generan, esto puede conducir a una reducción del CO, pero por lo mismo se podría incrementar el CO_2 (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	Rakopoloulos 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 NOx 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 NOx (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 NOx	CO y HC	Butanol (20%) genera aumento de BSFC y BTE	Atmanli et al 2016a
Humo, CO y NOx	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 NOx	CO y HC	A mayor cantidad de butanol, mayor caída de humo	Yilmaz et al 2014
Hollín	CO y NOx	El humo se reduce en cuanto el butanol incrementa	Rakopoulos et al 2010
NOx	-	Con 40% de butanol, el BTE y el NOx se redujeron con EGR	Chen et al 2014
Humo, CO y NOx	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
Hollín	--	Mezclas de 20 y 40% de pentanol	Ma et al 2017
--	HC	Con la adición de n-pentanol el HC aumenta	Kumar et al 2016 ab
Hollín y NOx	CO y HC	Mejor eficiencia sin EGR	Li et al 2015
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 evaporiza, 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 mezcla 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 CO_2, 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 aumento conforme al incremento de fumigación y el BTE disminuyo mientras que el CO también causo 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 logro 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 (Homogeneus Charge Compresion 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 hidrogeno, 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 realizo 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 resulto 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 este

diseñado en la aplicación de alcoholes lo que agregara más complejidad en su aplicación pero a su vez mejorara 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

[1] 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

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] Alenezi R, Santos R, Raymahasay S, Leeke G. (2013). Improved biodiesel manufacture at low temperature and short reaction time. Renew Energy, 53:242–8.

[6] Al-Hamamre Z, Yamin J. (2013). The effect of hydrogen addition on premixed laminar acetyleneehydrogeneair and ethanolehydrogeneair flames. Int J Hydrogen Energy, 38:7499e509.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Atmanli A. (2016). Comparative analyses of dieselewaste oil biodiesel and propanol, n-butanol or 1-pentanol blends in a diesel engine. Fuel 176, 209-215.

[10] Atmanli A, Erol Ileri, Nadir Yilmaz. (2016a). Optimization of diesel-butanolvegetable oil blend ratios based on engine operating parameters, Energy 96 (1) 569-580.

[11] Atmanlı 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.

[12] Amrouche F, Erickson PA, Park JW, 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] Britto RF, Jr., Martins CA. (2014). Experimental analysis of a diesel engine operating in Diesel-Ethanol Dual-Fuel mode. Fuel, 134:140–50.

[18] Babu VM, 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.

[19] Calam A, Solmaz H, Uyumaz A, Polat S, Yilmaz E, Içingür Y. (2015). Investigation of usability of the fusel oil in a single cylinder spark ignition engine. J Energy Inst, 88:258–65.

[20] Campos-Fernández J, Arnal JM, Gómez J, Dorado MP. (2012). A comparison of performance of higher alcohols/diesel fuel blends in a diesel engine. Appl Energy, 95:267–75.

[21] Campos-Fernández J, Arnal JM, Gomez J, Lacalle N, Dorado MP. (2013). Performance tests of a diesel engine fueled with pentanol/diesel fuel blends. Fuel, 107:866–72.

[22] 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.

[23] Chauhan BS, Kumar N, Pal SS, Du Jun Y. (2011). Experimental studies on fumigation of ethanol in a small capacity diesel engine. Energy, 36:1030–8.

[24] 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.

[25] 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.

[26] Chen, Z.F., Yao, C.D., Yao, A.R., et al., (2017). The impact ofmethanol injecting position on cylinder-to-cylinder variationin a diesel methanol dual fuel engine. Fuel 191, 150-163.

[27] Cheng CH, Cheung CS, Chan TL, Lee SC, Yao CD, Tsang KS. (2008). Comparison of emissions of a direct injection diesel engine operating on biodiesel with emulsified and fumigated methanol. Fuel, 87:1870–9.

[28] Cheung CS, Cheng C, Chan TL, Lee SC, Yao C, Tsang KS. (2008). Emissions character- istics of a diesel engine fueled with biodiesel and fumigation methanol. Energy Fuels, 22:906–14.

[29] 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.

[30] Doğan O. (2011). The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diésel engine performance and emissions. Fuel, 90(7):2467–72.

[31] 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.

[32] Gautam M, Martin DW. (2000). Combustion characteristics of higheralcohol/gasolina blends. Proc Inst Mech Eng; 214A:497-511.

[33] 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

[34] Greenwood JB, Erickson PA, Hwang J, Jordan EA. (2014). Experimental results of hydrogen enrichment of ethanol in an ultra-lean internal combustion engine. Int J Hydrog Energy, 39:12980–90.

[35] 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.

[36] 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.

[37] 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 dieselengines, Appl. Energy. 128; 347–359.

[38] Hariharan S, Murugan S, Nagarajan G. (2013). Effect of diethyl ether on Tyre pyrolysis oil fueled diesel engine. Fuel; 104:109–15.

[39] 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.

[40] Heisey JB, Lestz SS. (1981). Aqueous Alcohol Fumigation of a Single-Cylinder DI Diesel Engine. SAE Technical Paper 811208; https://doi.org/10.4271/811208.

[41] 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.

[42] Hossain, Md. 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.

[43] Hou, J., Wen, Z., Jiang, Z., et al., (2014). Study on combustion andemissions of a turbocharged compression ignition enginefueled with dimethyl ether and biodiesel blends. Journal ofthe Energy Institute 87 (2), 102-113.

[44] 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.

[45] Ileri E, Atmanli A, Yilmaz N. (2016). Comparative analyses of n-butanol–rapeseed oil–diésel blend with biodiesel, diesel and biodiesel–diesel fuels in a turbocharged direct injection diesel engine. J Energy Inst. 89:586–93.

[46] 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 diésel engines: a review. Chem. Eng. Commun. 204 (10), 1202–1223.

[47] Jamrozik, A.; Tutak, W.; Grab-Rogali ´nski, 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

[48] 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.

[49] 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.

[50] 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.

[51] Kleinert M, Barth T. (2008). Towards a lignincellulosic biorefinery: direct one-step conversion of lignin to hydrogen-enriched biofuel. Energy & Fuels, 22(2):1371–9.

[52] 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

[53] Kumar AS, 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.

[54] 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.

[55] 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.

[56] Kumar B.R, S. Saravanan. (2017). Use of higher alcohol biofuels in diesel engines: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 60; 84–115.

[57] 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.

[58] 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.

[59] 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.

[60] 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

[61] 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.

[62] Li, G., Zhang, C.H., Li, Y.Y., et al. (2016). Effects of diesel injectionparameters on the rapid combustion and emissions of anHD common-rail diesel engine fueled with diesel-methanoldual-fuel. Applied Thermal Engineering 108, 1214e1225.

[63] 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.

[64] 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.

[65] 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.

[66] 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.

[67] Mendiburu AZ, 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

[68] 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.

[69] Örs, İlker & Sarikoc, Selcuk & Atabani (A.E. Atabani), Abdulaziz & Ünalan, Sebahattin & Akansu, Selahaddin. (2018). The effects on performance, combustion and emission characteristics of DICI engine fuelled with TiO2 nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends. Fuel. 234. 188. 10.1016/j.fuel.2018.07.024.

[70] Pandian, Murugesa & 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.

[71] Park SH, Lee CS. (2014). Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel. Energy Convers Manage; 86:848–63.
[72] Park, S., Cho, J., Park, J., et al. (2017). Numerical study of theperformance and NOx emission of a diesel-methanol dual-fuel engine using multi-objective Pareto optimization. Energy124, 272-283.
[73] 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.
[74] Qian Y, L. Ouyang, X. Wang, L. Zhu, X. Lu. (2015). Experimental studies on combustión and emissions of RCCI fueled with n-heptane/alcohols fuels, Fuel 162; 239–250.
[75] Rakopoloulos, DC, Rakopoloulos, CD, Kakaras, EC. (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.
[76] 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:101016/jenconman201002032
[77] Rakopoulos DC, Rakopoulos CD, Hountalas DT, Kakaras EC, Giakoumis EG, Papagiannakis RG. (2010a). Investigation of the performance and emissions of bus engine operating on butanol/diesel fuel blends. Fuel; 89(10):2781–90.
[78] Raviteja S, Kumar GN. (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.
[79] 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.
[80] Saxena S, David Vuilleumier, Darko Kozarac, Martin Krieck, 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.
[81] Saxena P., Alpana 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.
[82] Satsangi DP, 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.
[83] Semelsberger TA, Borup RL, Greene HL. (2006). Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. J Power Sources, 156:497–511.
[84] Selim, MYE. (2001). Características presión-tiempo en motores diesel alimentados con gas natural. Energía Renovable, 22: 473 – 489.
[85] Serrano-Ruiz JC, West RM, Dumesic J. (2010). Catalytic conversion of renewable biomass resources to fuels and chemicals. Annu Rev Chem Biomol Eng.1(1):79–100.
[86] 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.
[87] Shayan BS, Seyedpour SM, Ommi F, Moosavy SH, Alizadeh M. (2011). Impact of methanolegasoline fuel blends on the performance and exhaust emission of a SI engine. Int J Automot Eng, 1.
[88] 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.
[89] 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.
[90] 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.
[91] 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.
[92] Sudheesh K, Mallikarjuna JM. (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/jenergy.2010.04.052.
[93] Szwaja S, Naber JD. (2010). Combustion of n-butanol in a spark-ignition IC engine. Fuel; 89:1573–82.
[94] 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.
[95] 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.

[96] 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.

[97] 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.

[98] 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.

[99] Yilmaz N, Ileri E, Atmanli A. (2016). Performance of biodiesel/higher alcohols blends in a diesel engine. Int J Energy Res; 40:1134e43.

[100] Yilmaz N, Vigil FM, Benalil K, Davis SM, Calva A. (2014). Effect of biodiesel-butanol fuel blends on emissions and performance characteristics of a diesel engine. Fuel; 135:46–50.

[101] 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.

[102] Youn, I.M., Su, H.P., Roh, H.G., et al. (2011). Investigation on thefuel spray and emission reduction characteristics fordimethyl ether (DME) fueled multi-cylinder diesel enginewith common-rail injection system. Fuel Processing Technology 92 (7), 1280-1287.

[103] Yousufuddin S, Masood M. (2009). Effect of ignition timing and compression ratio on the performance of a hydrogeneethanol fuelled engine. Int J Hydrogen Energy; 34:6945e50.

[104] Yousufuddin S, Mehdi SN, Masood M. (2008). Performance and combustion characteristics of a hydrogen-ethanol-fuelled engine. Energy Fuels; 22:3355–62.

[105] 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.

[106] Zhang ZJ, Wang TY, Jia M, Wei Q, Meng XZ, Shu GQ. (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.

[107] Zhang B, Ji C, Wang S, Liu X. (2014a). Combustion and emissions characteristics of a spark-ignition engine fueled with hydrogenemethanol blends under lean and various loads conditions. Energy; 74:829–35.

[108] 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.

[109] Zhang T, Nilsson LJ, 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.

[110] Zhang ZH, Chua SM, Balasubramanian R. (2016b). Comparative evaluation of the effect of butanol–diesel and pentanol–diesel blends on carbonaceous particulate composition and particle number emissions from a diesel engine. Fuel; 176:40–7.

[111] 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.

[112] 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.