



Análisis de la mezcla de alcoholes en motor diésel

Resumen

Debido a que el futuro del petróleo es incierto, en la búsqueda de los combustibles alternativos se ha encontrado que el alcohol es un fuerte candidato como combustible; los alcoholes inferiores más representativos son el metanol y el etanol, los cuales han demostrado en general baja miscibilidad, por lo que pueden generar una separación de fases al ser mezclados después de un cierto tiempo. La única manera de emplearlos en un motor diésel es mezclándolos con biodiésel o con surfactantes. Por el contrario, los alcoholes superiores tienen características más adecuadas para ser mezclados o empleados en el motor diésel. Por su parte, los éteres son una buena opción cuando se trate de combustión piloto en que se considere emplear combustibles gaseosos como el biogás o el syngas en motor diésel dual. En esta investigación se exploran las alternativas que existen para mejorar las características del alcohol, por ejemplo, mezclarlo con biodiésel, biogás, agua o nanopartículas, y también se analizan las emisiones que se producen con las mezclas generadas. El objetivo es indagar las diferencias entre los alcoholes inferiores y los alcoholes superiores de cadena larga, así como las mezclas que se pueden generar para mejorar el rendimiento del motor. Los resultados afirman que los alcoholes de cadena larga tienen mejores propiedades físico-químicas que los alcoholes de cadena corta; el butanol es el único combustible que puede ser transportado y almacenado en las mismas redes de tuberías actuales de los productos petroleros existentes. También se cuenta con la opción de usar el alcohol como combustible piloto en un motor diésel dual; esto puede servir para aplicar una enorme variedad de combustibles tanto líquidos como gaseosos, lo cual hace que las opciones en su aplicación se incrementen. Como conclusión, se recomienda explorar nuevas mezclas analizando sus sinergias con varios combustibles alternativos. La posibilidad de realizar el diesterol-BED genera resultados muy alentadores, por lo que se recomienda seguir haciendo análisis sobre esa línea para encontrar la mezcla óptima.

Palabras clave: alcohol; motor diésel; energía renovable; biocombustible.

Analysis of alcohol mixture in diesel engine

Abstract

As the future of oil is uncertain and in the search for alternative fuels, it has been found that alcohol is a strong candidate as a fuel. The most representative lower alcohols are methanol and ethanol, which have generally demonstrated low miscibility so that they can generate phase separation when mixed after a certain period of time. The only way to use them in a diesel engine is to mix them with biodiesel or surfactants. By contrast, higher alcohols have more suitable characteristics to be mixed or used in the diesel engine. In the case of ethers they are a good option when it comes to pilot combustion considering using gaseous fuels such as biogas or syngas in dual diesel engine. This research explores the alternatives that exist to improve the characteristics of alcohol as it can be mixed with biodiesel, biogas, water or nanoparticles and also analyzes the emissions that are generated with the mixtures. The aim of this research is to explore the differences between lower alcohols and long chain upper alcohols, as well as the mixtures that can be generated to improve engine performance. The results of this research claim that long-chain alcohols have better physico-chemical properties than short-chain alcohols, butanol being the only fuel that can be transported and stored in the same current pipeline networks of existing oil products. There is also the option to use alcohol as a pilot fuel in a dual diesel engine. The latter can be used to apply a huge variety of both liquid and gaseous fuels, this makes the options in its application increase. As a conclusion of this work, it is recommended to explore new mixtures analyzing their synergies with various alternative fuels. The possibility of performing diesterol-BED generates very encouraging results, therefore it is recommended to continue to perform analyses on that line to find the optimal mixture.

Keywords: Alcohol; diesel engine; renewable energy; biofuel.

Análise da mistura de álcoois em motores diesel

Resumo

Na busca por combustíveis alternativos porque o futuro do petróleo é incerto, verificou-se que o álcool é um forte candidato como combustível, onde os álcoois inferiores mais representativos são o metanol e o etanol, que, em geral, demonstraram baixa miscibilidade, de modo que podem gerar separação de fase quando misturadas após um determinado período de tempo, a única forma de as utilizar num motor diesel é misturá-las com biodiesel ou tensoativos, pelo contrário, os álcoois superiores têm características mais adequadas para serem misturados ou utilizados no motor diesel, no caso dos éteres, são uma boa opção quando se trata de combustão piloto, considerando a utilização de combustíveis gasosos, como biogás ou gás de síntese em motores a diesel duplos, esta pesquisa explora as várias alternativas que existem para melhorar as características do álcool, pois pode ser misturado com biodiesel, biogás, água ou nanopartículas e também analisa as emissões que são geradas com as misturas geradas. O objetivo desta pesquisa é explorar as diferenças entre álcoois inferiores e álcoois superiores de cadeia longa, bem como as misturas que podem ser geradas para melhorar o desempenho do motor. Os resultados desta pesquisa afirmam que os álcoois de cadeia longa têm melhores propriedades físico-químicas do que os álcoois de cadeia curta, sendo o butanol o único combustível que pode ser transportado e armazenado nas mesmas redes de gasodutos atuais que os produtos petrolíferos existentes, há também a opção de usar álcool como combustível piloto em um motor diesel duplo, Este último pode ser usado para aplicar uma enorme variedade de combustíveis líquidos e gasosos, o que aumenta as opções em sua aplicação. Como conclusão deste trabalho recomenda-se explorar novas misturas analisando suas sinergias com vários combustíveis alternativos, a possibilidade de realizar diesterol-BED gera resultados muito encorajadores, portanto, recomenda-se continuar a realizar análises nessa linha para encontrar a mistura ideal.

Palavras-chave: Álcool; diesel; energia renovável; biocombustíveis.

Introducción

En el futuro los productos del petróleo serán escasos y costosos, y si se tiene en cuenta la contaminación que estos generan, representan una amenaza para el medio ambiente. Para superar esto, se buscan combustibles alternativos [1]. La biomasa proporciona aproximadamente el 13% del suministro mundial de energía primaria y más del 75% de la energía renovable mundial. De hecho, se estima que la bioenergía podría contribuir con entre 25 y 33% del suministro mundial de energía para el 2050 [2]. Los biocombustibles no son de ninguna manera una tecnología emergente: a finales del siglo XIX ya se usaban lámparas de etanol [3]; posteriormente, los vehículos que solo tenían como combustible etanol eran muy populares en la década de 1980, pero se volvieron económicamente imprácticos cuando los precios del petróleo cayeron y los precios del azúcar aumentaron a finales de esa década [4]. Entre los alcoholes más estudiados se encuentran etanol, butanol, metanol, aceite de fusel y los ésteres MTBE (éter metil tert-butílico) y DME (dimetil éter) aplicados como combustible en los motores [5]. Las mezclas alcohol-diésel pueden ser una solución prometedora como combustibles más limpios, debido a que pueden mejorar la combustión y generar temperaturas más bajas en el motor [6]. Otros autores recomiendan la adición de H_2 (hidrógeno) a la mezcla de alcoholes [7]; también se han definido algunas mezclas como la del diésel-biodiésel-etanol con un nuevo término: diesterol [8].

En este estudio se presenta un análisis sobre las alternativas que existen para mejorar las características del alcohol, y con esto hacerlo más atractivo como biocombustible, por lo que se analizan las propiedades y el rendimiento de los alcoholes superiores y los alcoholes inferiores de cadena corta, y también se analiza la posibilidad de realizar mezclas con diferentes sustancias tratando de encontrar la mezcla óptima.

Propiedades físico-químicas de alcoholes y éteres

Aunque existen numerosas tecnologías de conversión, las propiedades de los combustibles varían significativamente. Incluso cuando se utiliza la misma materia prima [9], la variación de la composición química, tal como la longitud de la cadena de carbono y el grado de saturación/insaturación, cambia las propiedades físico-químicas del combustible [10]. El alcohol tiene una estabilidad a la oxidación superior y fluidez a baja temperatura en comparación con el biodiésel. Por lo tanto, los alcoholes tienen mejores características de manejo de combustible para el uso del motor en comparación con el biodiésel [11]. Desafortunadamente, también los alcoholes tienen sus desventajas físico-químicas; estas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Desventajas en las propiedades físico-químicas del alcohol en motores.

Tipo de causa	Provoca	Tipo de alcohol	Referencias
Combustión oxigenada	Bajo punto de ebullición y altas presiones de vapor	Bioalcoholes	[12]
Alto contenido de agua y humedad	Por la pérdida de calor puede disminuir su eficiencia	Aceite de fusel y etanol	[13]
Contenido de cenizas en los combustibles	Afecta el rendimiento del motor y el entorno ambiental	Biocombustible	[14]
Tener menor carbono y más oxígeno	Bajo valor de calentamiento	Alcoholes de cadena corta	[12]
Por ser disolventes	Corrosión en algunas partes del motor	Metanol, aceite de fusel	[12]

Alcoholes inferiores de cadena corta

Los alcoholes inferiores más representativos y usados son el metanol y el etanol [15]. Los alcoholes de cadena corta en el motor diésel tienen propiedades pobres, tales como el índice de cetano inferior, valor calorífico y viscosidad cinemática [16]; también han demostrado baja miscibilidad y realizan separaciones de fases después de cierto tiempo [17]. El etanol es de difícil autoignición y no genera liberación de calor a baja temperatura [18]; además tiene poca o nula liberación de calor a temperatura intermedia, y con la presencia de agua el etanol es más difícil de iniciar [19]. El etanol puede reducir la temperatura del gas en el cilindro y proporciona una zona de enfriamiento más grande, lo que lleva a una mayor emisión de CO (monóxido de carbono) [20]. Debido a la capacidad de generar combustión completa (Figura 1), el bioetanol tiene el potencial de aumentar la eficiencia de combustión [21] y con esto reducir la emisión de HC (hidrocarburos no quemados) [20]. El etanol tiene un alto calor de vaporización; por lo tanto, reduce la temperatura máxima dentro del cilindro y esto hace reducir los NOx (óxidos de nitrógeno), lo que aumenta la potencia del motor [7]. El metanol tiene un alto número de octanaje, alta velocidad laminar de la llama, amplio límite de inflamabilidad y alto calor latente de vaporización [22]. El metanol es tóxico, líquido, sin sabor, incoloro y generalmente se conoce como alcohol de madera. Su estructura química simple puede conducir a menores emisiones y una mejor combustión [13].

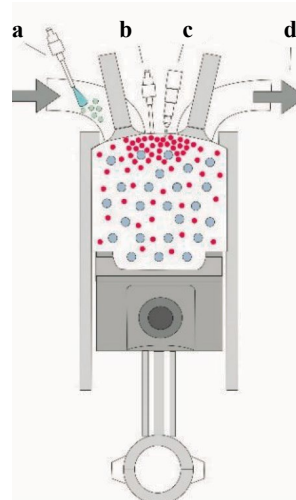


Figura 1. Inyección del alcohol en motor CI. a) Inyección de alcohol, b) inyección directa diésel, c) sensor de presión, d) escape. (Elaboración propia).

Alcoholes superiores de cadena larga

Recientemente, los investigadores han demostrado mayor interés en los alcoholes de cadena larga, ya que tienen mejores propiedades físico-químicas que los alcoholes de cadena corta [17]. A medida que aumenta el número de carbonos en la estructura química de los alcoholes, las propiedades básicas del combustible también mejoran; por ejemplo, la capacidad de disolverse, la baja polaridad y la naturaleza menos higroscópica hacen que la mezcla sea muy fácil con diésel y biodiésel; se evita así separación de fases [23] y se logra un menor retardo de encendido [24]. Además, tienen mayor valor calorífico, mayor volatilidad, menos problemas de ignición, solubilidad, mayor viscosidad, no presentan problemas de separación de fases y cuentan con mejores propiedades de flujo en frío. Además de una mejor estabilidad de mezcla y alta densidad, tiene también mejor lubricidad y menor riesgo de corrosión [25]. Por estas razones se sugieren los alcoholes altos en carbono para los motores diésel [26]. El uso del butanol tiene ventajas, ya que es el único combustible a base de alcohol que puede ser transportado fácilmente

por las redes de tuberías de productos petroleros existentes, en lugar de transportarse únicamente en camiones con cisternas y vagones de ferrocarril [27]. En la Tabla 2 se muestran las ventajas del butanol.

Tabla 2. Ventajas del butanol sobre el etanol y el metanol.

Ventaja del butanol	Beneficio	Referencia
Mejor miscibilidad con el combustible diésel	Mezcla con diésel	[28]-[32], [20]
Menor calor de evaporización	Menor pérdida	[28], [31], [20]
Mayor valor calorífico	Mejor combustión	[20], [21], [31]
No tiene separación de fases	Mejor mezcla	[32]
Menor consumo de combustible	Mejor combustión	[11]
Mejor estabilidad de mezcla	El sistema de inyección mejora y protege al motor	[11], [29], [30]
Genera menor temperatura de autoignición	Es más fácil de aplicar al motor	[11], [28]
Menor corrosión	Más durabilidad en las partes del motor	[29], [30], [33]
Mejor arranque del motor	Mejora arranque en climas fríos	[28]
No es higroscópico	No absorbe el agua	[32]
Tiene el doble de átomos de carbono que el etanol	Incrementa el valor calorífico	[33]
Tiene mayor densidad que el etanol	Reduce el consumo de combustible y mejora el rendimiento	[33]
Se pueden usar mezclas más magras	Reduce emisiones	[33]
Mejora la mezcla	Ofrece mejor rendimiento en el motor	[21]
Menos tóxico y mejor solubilidad	Mejor uso en mezcla con diésel	[28]
Mayor viscosidad y lubricidad	Protege el motor y evita el desgaste	[28]

El inconveniente de usar el butanol es que puede generar un incremento del BSFC (el consumo de combustible específico del freno), pero al mismo tiempo puede lograr disminuir las emisiones de CO, NO_x y humo, pero con una reducción de BTE (eficiencia térmica del freno) y con un aumento de las emisiones de HC [34]. El butanol muestra una capacidad de reducción de hollín más evidente y ofrece una mayor eficiencia del combustible comparándolo con el biodiésel [35], [36]. Las mezclas de butanol/diésel no requieren cosolventes o agentes mezcladores, debido a su naturaleza menos hidrófila [37]. Por otro lado, el geraniol es un alcohol de orden superior que se obtiene a partir de la reacción con solución ácida y forma turpineol el cual ayuda a mejorar el rendimiento del motor [38]. Con esto se puede llegar a concluir que el alcohol superior sería un posible sustituto del biodiésel en un motor diésel [39]. Otros alcoholes superiores como el 1-pentanol y el n-octanol se presentan en las Tablas 3 y 4 respectivamente.

Tabla 3. Ventajas del pentanol sobre el metanol y el etanol.

Ventaja	Beneficio	Referencia
Mejores propiedades de combustión	Mejora la combustión	[17], [35], [40]
Tiene baja polaridad y es hidrófilo	No muestra separación de fases	[17], [40], [41], [42]
Es miscible con diésel y aceite	Mejora la mezcla	[17], [25], [35], [40], [41], [42]
Mayor número de cetano	Mejor rendimiento	[25], [40], [41], [35], [42]
Mayor velocidad de la llama y viscosidad	Mayor valor calorífico	[25], [40], [41], [42]
Menor calor de evaporización y presión	Mejora la eficiencia	[25], [40], [35]
Menor riesgo de corrosión	Durabilidad	[25], [40], [41], [42]

Tabla 4. Beneficios del octanol sobre los alcoholes de cadena corta y el biodiésel.

Cualidad	Logro	Referencia
Altamente miscible al diésel	Mejor mezcla	[43]
Emisiones de humo ultrabajas	Reducción de humo	[44]
Mejores propiedades de flujo en frío	Punto de fluidez de 9 °C	[45]
Menos corrosivo que el resto de alcoholes	Naturaleza hidrofóbica	[46]
Tiene baja presión de vapor	Puede ser seguro en el traslado y almacenamiento	[46]
Alta tensión superficial y baja presión	Mejor pulverización	[44]
Cadena más larga y menos ramificada	Genera mayor densidad energética	[47]
Mayor número de cetanos, valor calorífico y la temperatura de autoignición	Propiedades similares al diésel	[39], [46]

Características de los éteres como biocombustibles

El DEE (éter dietílico) tiene el potencial para hacer el suplemento de combustible más adecuado para los motores diésel, debido a su número de cetano y valor de calefacción, el cual es mayor en comparación con el etanol y el butanol y además es miscible con el combustible diésel y biodiésel [48]. El DEE en modo de combustible dual puede usarse como combustible piloto, y de esta forma se podrían usar como combustible primario algunos combustibles alternativos como el gas natural comprimido, gas licuado de petróleo y biogás [49], [50]. Aunque tiene menor valor calorífico en comparación con el diésel y el biodiésel, su menor viscosidad y densidad mejoran la calidad de atomización del combustible, lo que lleva a una mejor eficiencia de combustión [51]. El DEE es de naturaleza renovable y se puede producir fácilmente mediante el etanol a un precio aceptable [50]. El DME tiene muchas propiedades y se cree que es uno de los mejores combustibles alternativos en motores CI en el futuro, debido a su alto índice de cetano que es 55, en comparación con el diésel que es 40-53, tiene bajo ruido de combustión, alto nivel de eficiencia térmica, genera combustión sin hollín y con bajos niveles de NO_x [52]. También tiene mayor contenido de oxígeno que los combustibles convencionales (aproximadamente 35%) y no tiene enlace directo carbono-carbono (C-C), por lo tanto, tiene reducciones de contaminantes tales como PM (la materia particulada) y HC [53]. Aun así, sufre de baja viscosidad y carece de buenas características de lubricación, por lo que el uso de aditivos de lubricidad como Lubrizol (539 N) o biodiésel puede mejorar la viscosidad y lubricidad del DME [53]. Por su menor valor de calentamiento (alrededor de 28,4 MJ/kg) requiere casi el doble de cantidad de combustible inyectado por ciclo para llegar a tener la misma potencia del motor [54]. Además, el bajo punto de ebullición del DME y su rápida evaporación requieren almacenarlo bajo presión constante para mantenerlo en fase líquida y así evitar su evaporación [55]. En la Figura 2 se hace un resumen de los alcoholes más representativos para los motores de combustión interna.

Mezclas en general con alcohol en motor diésel

En la mezcla de dos líquidos pueden tener diferentes propiedades químicas, por lo que pueden existir problemas de inestabilidad y separación durante el funcionamiento del motor; esta es la razón de agregar aditivos (cosolventes) y de esta manera superar el problema de separación de fases [56]. Los aditivos oxigenados pueden ayudar a encender el combustible más fácilmente y reducir la contaminación del escape del motor [57]. El hidroxitolueno butilado y el n-butanol son aditivos antioxidantes que con

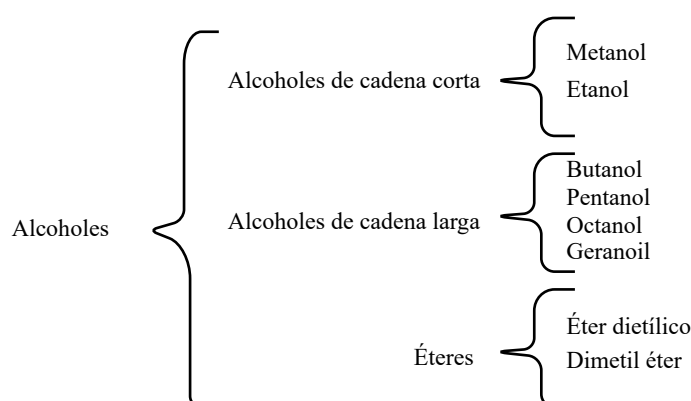


Figura 2. Cuadro sinóptico de los alcoholes aplicados en los motores de combustión interna.

Tabla 5. Desempeño del motor aplicando mezclas de aceites con alcoholes.

Emisión que reduce	Tipos de mezclas	Desempeño del motor	Referencia
NOx	1-octanol con 5% de aceite de palma y 95% de diésel y adición de 2EHN	Combustión mejorada y mayor BTE	[60]
NOx, CO y humo	1-octanol mezclado con diésel	Mejora el BTE pero con mayores emisiones de HC	[61]
CO y HC	Biodiésel con n-butanol y pentanol	Mejora el BTE y el BSFC, y se concluye que es mejor e pentanol que el n-butanol	[62]
CO y HC	1-octanol (10%, 20% y 30%) mezclado con diésel	La adición de 1-octanol mejora el BTE, pero aumenta el NOx	[63]
NOx	Mezcla de DME con biodiésel	Reducción del retardo de encendido	[64]
NOx	40% de diésel, 40% de biodiésel, 10% de aceite vegetal y 10% de propanol	Se tuvo el mayor BSFC y el menor NOx con un aumento de CO y HC	[65]
Varios	Biodiésel de aceite de girasol residual, diésel, n-pentanol y n-hexanol	La mezcla del n-hexanol con el biodiésel mejora los valores de BTE y BSFC	[66]
NOx	Residuos de aceite usado como biodiésel con propanol, n-butanol y pentanol	La mejor mezcla fue con pentanol	[23]
PM y hollín	Mezcla de DME con PODEn (polioximetilen dimetil ésteres)	Mejora la ignición y la calidad de pulverización; mejora el BTE, pero aumenta el NOx	[67]

biodiésel o diésel ayudan a reducir las emisiones de NOx, esto es debido a que el aditivo antioxidante tiene la capacidad de apagar los radicales libres durante la fase de combustión [58]. Uno de los métodos probados para mejorar el rendimiento y reducir el NO y el humo es agregar alcoholes como metanol, etanol, n-butanol y n-pentanol en mezclas de biodiésel o diésel [59]. En la Tabla 5 se muestra el desempeño del motor con mezclas de aceites con alcohol.

Raviteja *et al.* [68] estudiaron la mezcla de butanol enriquecido con hidrógeno y concluyeron que agregar hidrógeno reduce el consumo de combustible y además genera una disminución de emisiones. Diluir WPO (aceite de residuo de plástico) con alcohol, como etanol, metanol o butanol, tiene un beneficio adicional, ya que mejora significativamente las propiedades de almacenamiento y manejo de WPO [69]. Hellier *et al.* [70] investigaron el efecto de las cianobacterias para la obtención del geraniol en motor CI; los resultados mostraron que el uso de geraniol al 100% aumenta el retraso de ignición y aumenta el NO; sin embargo, si se mezcla con diésel reduce significativamente la emisión de NO, por lo que se llegó a la conclusión que el geraniol mejora su comportamiento de combustión con los aceites comestibles.

Propiedades del diesterol-BED

El bioetanol fue inicialmente considerado como un combustible alternativo para el motor SI debido a su mayor número de octanos; sin

embargo, en los últimos años, el bioetanol ha surgido como un combustible que puede mezclarse con diésel y biodiésel utilizando aditivos adecuados [71]. El etanol no es soluble en diésel y solo puede combinarse por medio del biodiésel que actúa como un intermediario; de hecho, el biodiésel actúa como un dispersante de partículas de etanol en el motor, creando así una mezcla estable. El etanol y el biodiésel son combustibles oxigenados que ayudan a mejorar la combustión. El etanol tiene un alto valor calorífico y baja densidad en comparación con el diésel puro y el biodiésel. Por otro lado, el biodiésel posee un bajo nivel calorífico, por lo que se compensa [72]. El biodiésel-etanol-diésel (BED) es una mezcla de biocombustibles y diésel que tiene el valor energético cercano a los combustibles fósiles, ya que cuenta con excelentes propiedades en cuanto a su lubricación, densidad y viscosidad y se considera un combustible ecológico [73]. También se conoce la mezcla de diésel-biodiésel-etanol por un nuevo término: diesterol [8]. Esta mezcla (biodiésel-etanol-diésel) da como resultado una mayor velocidad de calor, mayor retraso de encendido y más corta duración de la combustión [20]. En la Tabla 6 se analiza el rendimiento del motor con diesterol.

El etanol tiene baja viscosidad y buenas propiedades de flujo en frío; el biodiésel se puede mezclar con etanol para disminuir su viscosidad y aumentar su volatilidad y mejorar sus propiedades de flujo en frío [77]. Además, el mayor contenido de oxígeno en el etanol puede reducir aún más la emisión de PM (la materia particulada) en comparación con el biodiésel [20]. Se puede observar en la Tabla 7 la relación de emisiones en el motor aplicando diesterol.

Tabla 6. Rendimiento del diesterol-BED en comparación con el diésel puro.

Rendimiento del motor	Esto generó	Referencia
El BTE aumentó ligeramente	Una mayor tasa de combustión	[74]
El BTE fue inferior	Menor rendimiento que con el diésel puro	[75]
El BSFC aumentó	Sucedio cada vez que se incrementó el etanol	[76]

Tabla 7. Concentraciones de emisiones en el motor CI con el diesterol-BED en comparación con el diésel puro.

Emisión que reduce	La causa de esto	Referencia
NOx	La mezcla reduce la emisión	[75]
CO, NOx y humo	Con la mezcla se logra la reducción	[20]
PM y NOx	Con la mezcla tiene mayor tasa de liberación de calor	[78]
NOx y humo	Tiene reducciones de emisiones y no sufre cambios en la eficiencia térmica	[20]
CO y NOx	En alta velocidad se reduce el NOx y tiene mayor eficiencia térmica	[79]
HC, CO y hollín	El etanol es un oxidante que reduce el BSFC	[74]
NOx	Esto se debe al alto calor latente de evaporización del etanol, que reduce la temperatura de combustión.	[80]

La presencia del biodiésel en la mezcla de etanol y diésel hace aumentar el índice de cetano y mejora la calidad de autoignición de la mezcla de combustible en general; por otra parte, agregar etanol a la mezcla de biodiésel-diésel reduce la alta densidad y viscosidad del biodiésel, con lo cual se logran propiedades físicas y características de evaporación y de tamaño de gota más adecuadas en la mezcla del combustible [81], y además la mezcla diésel-biodiésel-etanol contiene un alto contenido de oxígeno que aumenta el rendimiento del motor y reduce las emisiones de escape [82]. La estabilidad, almacenamiento y transporte son los primeros inconvenientes de la mezcla diesterol, lo que dificulta su aplicación comercial; sin embargo, esto puede ser resuelto agregando iso-pentanol a la mezcla, lo cual la hace más estable y segura para su aplicación [83].

Mezclas de aceite con alcohol superior de cadena larga

La adición de bioalcoholes mejora la atomización del combustible, se logra así una mejor combustión y por lo tanto se reducen los depósitos de carbono que se pueden encontrar en el motor, como en los aros de pistón, paredes de cilindros, inyectores, etc [31]. El aceite de pirolisis de la madera y el n-butanol se pueden mezclar sin ninguna separación de gases, ya que el n-butanol puede servir como disolvente orgánico, el cual es capaz de disolver partículas sólidas existentes y suprimir la polimerización [69]. En la Tabla 8 se muestra el comportamiento del motor agregando mezclas de butanol con biodiésel.

De acuerdo con Lapuerta *et al.* [90], el taponamiento del filtro punto frío, punto de nube y punto de fluidez se reducen con el aumento del contenido del butanol en las mezclas de biodiésel-butanol [20]. Es posible utilizar hasta un 40% de butanol y un 45% de pentanol como componentes de mezcla con diésel para alimentar el combustible de los motores CI y en el caso de mezclas con biodiésel se puede lograr hasta un 20% de butanol y pentanol sin alteraciones en el motor CI [37]. Las mezclas de pentanol-biodiésel tienen viscosidades más bajas, mayor contenido de oxígeno y mayor calidad de ignición, lo que ayuda a lograr una mayor atomización

y combustión; las mezclas de pentanol tienen mayor estabilidad de la mezcla y no muestran separación de fases [24]. Es posible reemplazar hasta el 60% del diésel con biocombustibles (30% de biodiésel más 30% de pentanol) utilizando una estrategia de doble inyección [37]. En la Tabla 9 se muestran el rendimiento y las emisiones aplicando la mezcla de biodiésel con n-pentanol.

Tabla 8. Rendimiento y emisiones de la mezcla de biodiésel con butanol.

Emisiones que reducen	Forma de aplicar	La causa de esto	Referencia
Hollín y NOx	Se inyecta el butanol a mayor presión de inyección	La inyección a mayor presión es una técnica viable para reducir emisiones	[84]
NOx y humo	Se mezcla con aditivos	Se mezcla con aceite de cocina usado y tiene una mejora en la combustión	[85]
CO y humo	Mezcla homogénea biodiésel/butanol	Con la mezcla se genera un aumento en BSFC	[86]
PM	29% de butanol	Con la adición del butanol mejoran las propiedades de combustión	[87]
PM	20% de butanol	Se aumenta el BTE agregando butanol y se obtiene un buen rendimiento	[88]
NOx y humo	10% de butanol y 90% de diésel/WPO	La mezcla de butanol mejora el rendimiento del motor y reduce emisiones	[89]

Tabla 9. Rendimiento y emisiones aplicando una mezcla de biodiésel con n-pentanol.

Emisión que se reduce	Forma de aplicar	La causa de esto	Referencia
Humo	Se mezcló con varias condiciones de carga	La mezcla de aceites de cocina usados mejora el rendimiento, pero con aumento de HC	[91]
NOx	Se mezcló con un 20% de pentanol sin EGR	La mezcla de aceite de cocina de desecho y pentanol resulta en una mejor eficiencia de combustión	[92]
PM	Se mezcló homogéneamente pentanol con diésel	Con la mezcla se reducen las emisiones	[93]
NOx, HC y CO	Se compararon las mezclas pentanol/biodiésel y pentanol/diésel	Se redujo el BTE en la mezcla pentanol/biodiésel	[94]

Aplicación de bioalcohol como combustible piloto utilizando biogás como combustible principal

En un motor de doble combustible con biogás como combustible principal, el biogás se puede depositar en el cilindro de combustión a través de un puerto de admisión con aire, mientras que el alcohol servirá como la

fuelle de ignición, el cual se inyecta directamente en la combustión del cilindro (piloto) [95]; este combustible piloto puede estar conformado de diésel, biodiésel o éteres como el DME. El DME se mantiene con casi cero niveles de humo cuando es aplicado como combustible piloto, o bien se puede hacer en mezclas con biodiésel como lo señalan Paul *et al.* [96], quienes estudiaron la combustión dual de la mezcla de combustible piloto oxigenado y concluyeron que con un mayor porcentaje de biodiésel y etanol en el combustible piloto aumenta la eficiencia de combustión del motor y también disminuyen los NOx. En otro trabajo, Karabektas *et al.* [97] consideraron agregar el DEE como combustible piloto y encontraron que se genera una mejora en el BTE y en el BSFC; esto se debe al alto número de cetano de DEE y su contenido de oxígeno; por lo tanto, el proceso de combustión se mejora. El DEE se evapora rápidamente y se mezcla con el aire fácilmente; forma así una mezcla homogénea y además su alto calor de evaporación resulta en una temperatura más baja, y con esto se pueden reducir los NOx. En la Tabla 10 se presenta el éter como combustible piloto en un motor que tiene como combustible principal el biogás.

Tabla 10. Emisiones y rendimiento en motor CI con la mezcla de biodiésel/biogás con DEE.

Emisión que reduce	Tipo de biodiésel/biogás	La causa de esto	Referencia
CO	WPO	Con WPO el BTE se incrementó (100% de DEE), pero aumentó el HC	[98]
NOx y humo	WPO	El BTE se incrementó (con 15% de DEE) y se tuvo una reducción de BSFC	[99]
NOx	WPO	El BTE se incrementó (con 10% de DEE)	[98]
CO, HC y NOx	Biodiésel/GNC	Un BTE mejorado con DEE en un combustible dual	[100]
CO	Biodiésel de soja	Mejora el BSFC (con 5% de DEE); sin embargo, si se agrega más del 40% de DEE, produce una tendencia de detonación	[49]
CO, HC y humo	Biodiésel/biogás	Produjo un aumento en BTE (con 6% de DEE) en la mezcla con biodiésel como combustible piloto	[49]
---	Gas acetileno	Se redujo el consumo de energía (con 10% de DEE)	[101]

Mezclas de bioalcohol con agua en motor diésel

Los bioalcoholes se pueden aplicar a los motores diésel mediante dos métodos: en modo de combustión dual y como emulsificación/microemulsificación [67]. A medida que aumenta el contenido de agua, la formación de NOx y el humo se reducen, pero el consumo de combustible, el CO y los HC se incrementan [102]. En el modo de emulsión (Figura 3) aumenta el BTE alrededor de un 6,6%; la razón de este aumento se debe a la eficiencia de combustión mejorada por una mejor atomización y evaporación del combustible que se produce como resultado de una microexplosión [56].

Algunos estudios confirman que los combustibles diésel/biodiésel se pueden mezclar con una baja relación de volumen de alcoholes para formar combustibles microemulsionados [67] (Figura 4). La microemulsión es un método utilizado para mezclar aceites vegetales o biodiésel con alcoholes y de esta manera reducir la viscosidad, y además sirve como disolvente (ejemplo, el butanol), debido a su mayor índice de cetano, menor riesgo de corrosión, menor polaridad y mayor valor calorífico [103]. Kannan *et al.* [104] estudiaron el efecto de las microemulsiones de diésterol-agua en motor diésel de un solo cilindro con diferentes cargas y una velocidad constante de 1500 rpm. Los resultados muestran que la microemulsión aumentó el BSFC y redujo el BTE, pero generó incrementos de CO, CO₂ y HC, aunque hubo reducciones significativas de NOx y humo. Otro estudio con resultados distintos lo presentan Mukhtar *et al.* [105]; ellos analizaron el efecto del etanol en la emulsión con diésel, en una emulsión tricombustible (etanol, biodiésel y diésel). Los resultados señalan que la tasa de liberación de calor y la presión dentro del cilindro de la emulsión tricombustible durante el período de retardo del encendido aumento en comparación al diésel. La tasa máxima de liberación de calor y la presión dentro del cilindro de las emulsiones tricombustibles mejoraron en comparación con las del diésel.

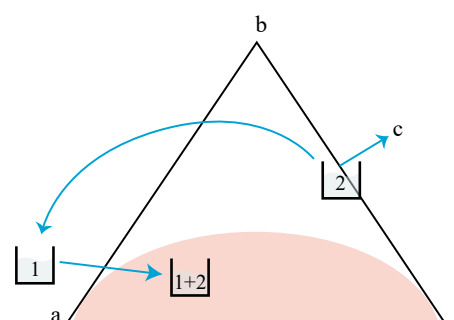


Figura 3. Emulsión con alcohol. a) Fase acuosa, b) surfactante + alcohol, c) mezcla autoemulsión, d) aceite + cosolvente. (Elaboración propia).

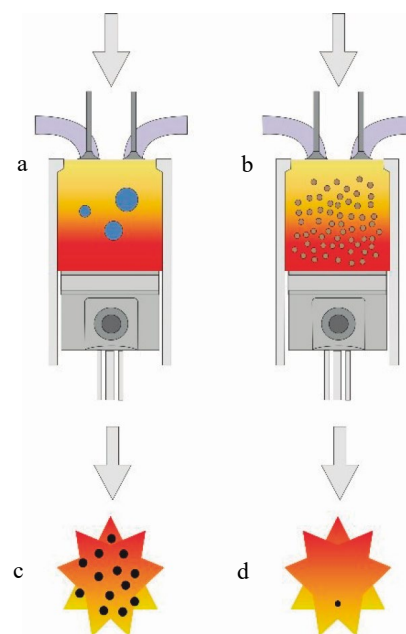


Figura 4. Comportamiento de emulsiones/microemulsiones. a) Motor sin emulsión, b) combustión con partículas, c) motor con emulsión, d) combustión limpia. (Elaboración propia).

Adición de nanopartículas con alcohol en motor CI

Las nanopartículas en las mezclas de combustible generan una oxidación debido a la alta relación del área de superficie-volumen y por su superficie reactiva más amplia, por lo que proporcionan mayor entalpía de combustión, con un aumento en la densidad energética [106]. Se ha demostrado que existe un gran potencial entre diversas mezclas como el n-butanol y BHT, con lo que se logra una mejor estabilidad a la oxidación y reducción de NOx [31]. Entre los estudios de mezclas de bioalcohol con nanopartículas destaca el de Venu *et al.* [107], en el cual investigaron el rendimiento y emisión de un motor diésel con una mezcla de diésel al 70%, biodiésel de aceite de Jatropha con 20%, etanol con 10% de combustible y con la adición de 25 ppm de nanopartículas de Al_2O_3 . Los resultados revelaron que la presión máxima del cilindro y el calor máximo de la tasa de liberación se alcanzaron más cerca de TDC (el punto muerto superior), y en el caso de las emisiones el HC, CO, NOx y la opacidad del humo se redujeron. Otro estudio destacable lo presentaron Shaafi *et al.* [108], quienes encontraron el efecto de las nanopartículas de alúmina, además de las mezclas de etanol e iso-propanol en un motor CI alimentado con biodiésel. El resultado mostró que la adición del etanol y la alúmina generó un aumento en la presión del cilindro de la tasa de liberación de calor. La temperatura de los gases de escape y el BTE aumentaron y además se redujeron las emisiones de CO y HC; sin embargo, los niveles de NOx aumentaron. Finalmente, otro estudio sobre este tema lo presentaron Selvan *et al.* [109], en el cual analizaron el efecto de incorporar nanopartículas de óxido de cerio y nanotubos de carbono en mezclas de diésel-biodiésel-etanol. Las nanopartículas de óxido de cerio actúan como catalizadores de suministro de oxígeno para oxidar el CO y reducir los óxidos de nitrógeno. La activación del óxido de cerio elimina los depósitos de carbono en el cilindro, lo que resulta en una reducción significativa de HC y emisiones de humo.

Conclusiones

Los alcoholes inferiores como combustible en los motores diésel solo pueden ser aplicados si se mezclan con biodiésel o con algún surfactante; en cambio, los alcoholes superiores son más adecuados para este tipo de motores. El n-butanol se destaca por su facilidad de desplazarse en las tuberías petroleras existentes; el pentanol por su parte tiene más estabilidad en la mezcla y no muestra separación de fases; si se logra tener una buena mezcla, se conseguirá una mejor atomización y combustión. Existe una gran variedad de alternativas de mezclas, entre las que se encuentran las emulsiones, las nanopartículas, los solventes, los aditivos oxigenados y antioxidantes, junto con las mezclas de los diferentes alcoholes además del biodiésel, que hacen que se tengan muchas opciones para generar valores en el desempeño del motor. Desafortunadamente, es necesario que se desarrolle una mayor aportación científica sobre la comparación de los efectos de los alcoholes inferiores (metanol y etanol) con los alcoholes superiores (butanol, pentanol y octanol) mediante análisis en el mismo motor bajo el mismo funcionamiento. Podemos asegurar que una de las claves de éxito para la aplicación de los biocombustibles es determinar la sinergia en la mezcla de alcoholes con otros compuestos que logren mejorar las condiciones del motor, a pesar de la variación que pueda generar el alcohol por las propiedades de su materia prima. Las flexibilidades en las propiedades de los alcoholes hacen que su mezcla con otras sustancias pueda ser efectiva, pero se recomienda emplear un intermediario que pueda servir para lograr una mezcla homogénea, por lo que los surfactantes pueden llegar a tener un protagonismo en el futuro. Por tal razón, este estudio recomienda su utilización. Una mezcla muy adecuada para la combustión puede ser el biodiésel con el pentanol, pero también puede ser con el n-octanol, y finalmente una mención especial al diesterol-BED. La posibilidad de elaborar una mezcla perfecta invita a seguir desarrollando investigaciones sobre esa línea.

Referencias

- [1] R. Krishnaiah, S. Mathew, P. Bhasker, and E. Porpatham, "Gaseous alternative fuels for CI engines - a technical review", *International Journal of Pharmacy and Technology*, 2016, 8, 5257-5268.
- [2] A. Hossain and P. Davies, "Pyrolysis liquids and gases as alternative fuels in internal combustion engines - A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 21, 165-189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.031>
- [3] M. Nguyen, G. Duddy, and C. Karam, "Analysis of Industrial Syngas Production from Biomass". PAM Review: *Energy Science & Technology*, 2015, 2, 67. DOI: <https://doi.org/10.5130/pamr.v2i0.1396>
- [4] P. Saxena, S. Alpana, Niharika, C. Nidhi, and A. Neha, "Twenty First Century Vehicle-Based On Non-Conventional Sources with Advanced Features", *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2016, vol. 03, no. 04, 2748- 2753.
- [5] O. Awad, R. Mamat, O. Ali, M. Y. Ismail, A. Adam, A. Yusop, and M. M. Noor, "The effect of adding fusel oil to diesel on the performance and the emissions characteristics in a single cylinder CI engine", *Journal of the Energy Institute*, 2016, 90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.04.004>
- [6] R. Niculescu, A. Clenci, and V. Iorga-Siman, "Review on the Use of Diesel-Biodiesel-Alcohol Blends in Compression Ignition Engines", *Energies*, 2019, 12, 1194, 1-41. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12071194>
- [7] S. Akansu, S. Tangöz, N. Kahraman, M. Ilhak, and S. Açıkgöz, "Experimental study of gasoline-ethanol-hydrogen blends combustion in an SI engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.014>
- [8] M. Nour, A. Elseesy, A. K. Abdel-Rahman, and M. Bady, "Influence of Adding Aluminum Oxide Nanoparticles to Diesterol Blends on the Combustion and Exhaust Emission Characteristics of a Diesel Engine", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusc.2018.07.009>
- [9] L. M. Díaz-Vázquez, A. Rojas-Pérez, M. Fuentes-Caraballo, I. V. Robles-Ramos, U. Jena, and K. C. Das, "Demineralization of Sargassum spp. macroalgae biomass: selective hydrothermal liquefaction process for bio-oil production", *Front Energy Res*, 2015, 3. DOI: [10.3389/fenrg.2015.00006](https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00006)
- [10] Y. Chen, R. Mu, M. Yang, L. Fang, Y. Wu, K. Wu, Y. Liu, and J. Gong, "Catalytic hydrothermal liquefaction for bio-oil production over CNTs supported metal catalysts", *Chem Eng Sci*, 2017, 161, 299-307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.12.010>
- [11] T. Yanai, G. Bryden, S. Dev, G- Reader, and M Zheng, "Investigation of ignition characteristics and performance of a neat n-butanol direct injection compression ignition engine at low load", *Fuel*, 2017, 208, 137-148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.096>
- [12] O. Awad, R. Mamat, T. Ibrahim, H. A. Thaeer, and A. M. Humada, "Overview of the oxygenated fuels in spark ignition engine: Environmental and performance", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018a, 91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.107>
- [13] O. I. Awad, R. Mamat, O. M. Ali, N. A. C. Sidik, T. Yusaf, K. Kadirgama, and M. Kettner, "Alcohol and ether as alternative fuels in spark ignition engine: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, Part 3, 2586-2605, ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.074>
- [14] O. I. Awad, O. M. Ali, A. T. Hamid, and R. Mamat, "Impact of fusel oil moisture reduction on the fuel properties and combustion characteristics of SI engine fueled with gasoline-fusel oil blends", *Renew Energy*, 2018b, 123, 79-91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.019>
- [15] I. I. Enagi, K. A. Al-attab, and Z. A. Zainal, "Liquid biofuels utilization for gas turbines: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 90, 43-55, ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.006>
- [16] A. Matuszewska, M. Odziemkowska, and J. Czarnocka, "Properties of bioethanol-diesel oil mixtures", *Energy*, 2016, 1.

- [17] H. Suhaimi, A. Abdullah, G. M. Anes, A. Zuhaira, O. Mohd Fahmi, K. Kamal, and Y. H. Ftwi, "Analysis of combustion characteristics, engine performances and emissions of long-chain alcohol-diesel fuel blends", *Fuel*, 2018, vol. 220, 682-691, ISSN 0016-2361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.019>
- [18] S. Saxena and I. D. Bedoya, "Fundamental phenomena affecting low temperature combustion in HCCI engines, high load limits and strategies for extending these limits", *Prog Energy Combust Sci*, 2013, 39(5), 457-88. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2013.05.002>
- [19] S. Saxena, D. Vuilleumier, D. Kozarac, M. Kriek, R. Dibble, and S. M. Aceves, "Optimal operating conditions for wet ethanol in a HCCI engine using exhaust gas heat recovery", *Applied Energy*, 2014, 116, 269-277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.033>
- [20] L. Wei, C. Cheung, and Z. Ning, "Effects of biodiesel-ethanol and biodiesel-butanol blends on the combustion, performance and emissions of a diesel", *Energy*, 2018, 155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.049>
- [21] S. Kumar, J. H. Cho, J. Park, and I. Moon, "Advances in diesel-alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2013, 22, 46-72.
- [22] K. Cacua, V. Olmos, B. Herrera, and A. Gallego-Montoya, "Experimental evaluation of a diesel-biogas dual fuel engine operated on micro-trigeneration system for power, drying and cooling", *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2016.02.067](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.067)
- [23] A. Atmanli, "Comparative analyses of diesel-waste oil biodiesel and propanol, n-butanol or 1-pentanol blends in a diesel engine", *Fuel*, 2016a, 176, 209-15.
- [24] A. Atmanli, E. Ileri, B. Yuksel, and N. Yilmaz, "Optimization of diesel-butanol-vegetable oil blend ratios based on engine operating parameters", *Energy*, 2016, 96, 569-80.
- [25] V. M. Babu, M. K. Madhu, and P. R. G. Amba, "Butanol and pentanol: the promising biofuels for CI engines-a review", *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2016, 78, 1068-88.
- [26] A. Atmanli and N. Yilmaz, "A comparative analysis of n-butanol/diesel and 1-pentanol/diesel blends in a compression ignition engine", *Fuel*, 2018, 234, 161-169. DOI: [10.1016/j.fuel.2018.07.015](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.015)
- [27] A. Vamshikrishna-Reddy, T. Sharath kumar, K. Tharun kumar, Y. V. S. Dinesh, and Sai santosh, "Energy and Exergy Analysis of I.C. Engines", *The International Journal of Engineering And Science*, 2014, vol. 3, no. 5, 07-26.
- [28] W. Trindade and R. Santos, "Review on the characteristics of butanol, its production and use as fuel in internal combustion engines", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2017, 69, 642-651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.213>
- [29] A. Fayyazbakhsh and V. Pirouzfar, "Comprehensive overview on diesel additives to reduce emissions, enhance fuel properties and improve engine performance", *Renew Sustainable Energy Rev*, 2017, 74, 891-901. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.046>
- [30] M. Z. Işık, H. Bayındır, B. İscan, and H. Aydın, "The effect of n-butanol additive on low load combustion, performance and emissions of biodiesel-diesel blend in a heavy duty diesel power generator", *J Energy Inst.*, 2017, 90(2), 174-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.02.006>
- [31] S. S. Prabu, M. A. Asokan, S. Prathiba, S. Ahmed, and G. Puthean, "Effect of additives on performance, combustion and emission behavior of preheated palm oil/diesel blends in DI diesel engine", *Renewable Energy*, 2018, vol. 122, 196-205, ISSN 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.068>
- [32] J. Jeevahan, R. B. Durairaj, and G. Mageshwaran, "Experimental Investigation of the suitability of 1-Butanol Blended with Biodiesel as an Alternative Biofuel in Diesel Engines", *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2018, 15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.05.013>
- [33] H. Wei, D. Feng, J. Pan, A. Shao, and M. Pan, "Knock characteristics of SI engine fueled with n-butanol in combination with different EGR rate", *Energy*, 2017, 118. DOI: [10.1016/j.energy.2016.11.134](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.134)
- [34] A. Ibrahim, "Performance and combustion characteristics of a diesel engine fuelled by butanol-biodiesel-diesel blends", *Appl Therm Eng*, 2016, 103, 651-9. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.144>
- [35] B. R. Kumar and S. Saravanan, "Use of higher alcohol biofuels in diesel engines: a review", *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2016a, 60, 84-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.085>
- [36] T. Yanai, X. Han, G. T. Reader, M. Zheng, and J. Tjong, "Preliminary investigation of direct injection neat n-butanol in a diesel engine", *J Energy Resour Technol ASME*, 2015, 137(1), 1-11.
- [37] M. V. Babu, K. Madhu, and A. Rao, "Butanol and pentanol: The promising biofuels for CI engines – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 78, 1068-1088. DOI: [10.1016/j.rser.2017.05.038](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.038)
- [38] S. Y. Lee, S. H. Kim, C. Y. Hong, S. Y. Park, and I. G. Choi, "Biotransformation of (-)- α -pinene and geraniol to α -terpineol and p-menthane-3, 8-diol by the white rot fungus, *polyporusbrumalis*", *J Microbiol*, 2015, 53(7), 462e7. DOI: [10.1007/s12275-015-5081-9](https://doi.org/10.1007/s12275-015-5081-9)
- [39] K. Nanthagopal, B. Ashok, S. Balusamy, S. Korah, and S. Chandra, "Effect of next generation higher alcohols and Calophyllum inophyllum methyl ester blends in diesel engine", *Journal of Cleaner Production*, 2018, 180, 50-63. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.01.167](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.167)
- [40] I. M. Yusri, R. Mamat, G. Najafi, A. Razman, O. I. Awad, and W. H. Azmi, "Alcohol based automotive fuels from first four alcohol family in compression and spark ignition engine: a review on engine performance and exhaust emissions", *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2017, 77, 169-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.080>
- [41] P. Singh, Varun, S. R. Chauhan, and N. Kumar, "A review on methodology for complete elimination of diesel from CI engines using mixed feedstock", *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2016, 57, 1110-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.090>
- [42] A. Atmanli, "Effects of a cetane improver on fuel properties and engine characteristics of a diesel engine fueled with the blends of diesel, hazelnut oil and higher carbon alcohol", *Fuel*, 2016b, 172, 209-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.013>
- [43] B. Kerschgens, L. Cai, H. Pitsch, B. Heuser, and S. Pischinger, "Di-n-buthylether, noctanol, and n-octane as fuel candidates for diesel engine combustion", *Combust. Flame*, 2016, 163, 66e78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.09.001>
- [44] B. Heuser, P. Mauermann, R. Wankhade, F. Kremer, and S. Pischinger, "Combustion and emission behavior of linear C8-oxygenates", *Int. J. Engine Res.*, 2015, 16(5), 627e638. DOI: <https://doi.org/10.1177/1468087415594951>
- [45] M. K. Akhtar, H. Dandapani, K. Thiel, and P. R. Jones, "Microbial production of 1-octanol: a naturally excreted biofuel with diesel-like properties", *Metab. Eng. Commun.*, 2015, 2, 1e5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meten.2014.11.001>
- [46] B. R. Kumar, S. Saravanan, D. Rana, V. Anish, and A. Nagendran, "Effect of a sustainable biofuel e n-octanol e on the combustion, performance and emissions of a DI diesel engine under naturally aspirated and exhaust gas recirculation (EGR) modes", *Energy Convers. Manage.*, 2016b, 118, 275e286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.001>
- [47] J. Campos-Fernandez, J. M. Arnal, J. Gomez, N. Lacalle, and M. P. Dorado, "Performance tests of a diesel engine fueled with pentanol/diesel fuel blends", *Fuel*, 2013, 107, 866e872. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.066>
- [48] K. R. Patil and S. S. Thipse, "Experimental investigation of CI engine combustion, performance and emissions in DEE-kerosene-diesel blends of high DEE concentration", *Energy Convers. Manage.*, 2015, 89, 396-408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.022>
- [49] D. Barik and S. Murugan, "Effects of diethyl ether (DEE) injection on combustion performance and emission characteristics of Karanja methyl ester (KME)-biogas fueled dual fuel diesel engine", *Fuel*, 2016, 164, 286-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.094>

- [50] S. Polat, "An experimental study on combustion, engine performance and exhaust emissions in a HCCI engine fuelled with diethyl ether-ethanol fuel blends", *Fuel Process Technol.*, 2016, 143, 140-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.11.021>
- [51] A. Ibrahim, "An experimental study on using diethyl ether in a diesel engine operated with diesel-biodiesel fuel blend", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2018, 21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.07.004>
- [52] Z. Azizi, M. Rezaeimanesh, T. Tohidian, and M. R. Rahimpour, "Dimethyl ether: a review of technologies and production challenges", *Chem Eng Process: Process Intensif*, 2014, 82, 150-72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2014.06.007>
- [53] A. Hegab, A. La Rocca, and P. Shayler, "Towards keeping diesel fuel supply and demand in balance: Dual-fuelling of diesel engines with natural gas", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 70, 666-697, ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.249>
- [54] G. Thomas, B. Feng, A. Veeraragavan, M. J. Cleary, and N. Drinnan, "Emissions from DME combustion in diesel engines and their implications on meeting future emission norms: A review", *Fuel Process Technol.*, 2014, 119, 286-304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.10.018>
- [55] J. Kropiwnicki, P. Dominiczak, Z. Kneba, S. Makowski, J. Cieśliński, and M. Ziolkowski, "Analysis of the possibilities of using of DME fuel in motor boat drive systems", *Combustion Engines*, 2017, 171(4), 74-80. DOI: 10.19206/CE-2017-413
- [56] M. J. Abedin, A. Imran, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, S. A. Shahir, M. Varman, and A. M. Ruhul, "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*, 2016, 60, 306-316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.118>
- [57] E. Ileri E and K. Günnur, "Experimental investigation of the effect of antioxidant additives on NOx emissions of a diesel engine using biodiesel", *Fuel*, 2014, 125, 44-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.007>
- [58] B. Dhinesh, Y. Raj, C. Kalaiselvan, and K. Ramalingam, "A numerical and experimental assessment of a coated diesel engine powered by high-performance nano biofuel", *Energy Conversion and Management*, 2018, 171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.039>
- [59] T. Subramanian, E. G. Varuvel, L. J. Martin, and N. Beddhanan, "Effect of lower and higher alcohol fuel synergies in biofuel blends and exhaust treatment system on emissions from CI engine", *Environ Sci Pollut Control Ser*, 2017, 24(32), 25103e13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0214-9>
- [60] L. Y. Phoon, A. A. Mustafa, H. Hashim, R. Mat, Z. A. Manan, and N. A. Yunus, "Performance and emission characteristics of Green diesel blends containing diethyl-succinate and 1-octanol", *J. Clean. Prod.*, 2017, 161, 1192-1202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.219>
- [61] A. Deep, N. Kumar, A. Karnwal, D. Gupta, V. Vibhanshu, A. Sharma, and J. S. Patel, "Assessment of the Performance and Emission Characteristics of 1-Octanol/Diesel Fuel Blends in a Water Cooled Compression Ignition Engine", *SAE Technical Paper*, 2014, 2014-01-2830. DOI: 10.4271/2014-01-2830
- [62] H. K. Imdadul, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, N. W. M. Zulkifli, A. Alabdulkarem, M. Kamruzzaman, and M. M. Rashed, "A comparative study of C₄ and C₅ alcohol treated diesel-biodiesel blends in terms of diesel engine performance and exhaust emission", *Fuel*, 2016, 179:281e8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.003>
- [63] V. Sriram, J. Jeevahan, G. Mageshwaran, G. B. Joseph, and R. B. Durairaj, "Engine Performance and Emission Characteristics of 1-Octanol Blended Bio-diesel in a Single Cylinder Diesel Engine, I", *J. Mechanical & Production Engineering Research and Development*, 2017, 7(6), 623-630. DOI: 10.24247/jimperddc201770
- [64] J. Hou, Z. Wen Z, Z. Jiang, and X. Qiao, "Study on combustion and emissions of a turbocharged compression ignition engine fueled with dimethyl ether and biodiesel blends", *Journal of Energy Institute*, 2014, 87, 102-113. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.021>
- [65] B. Yilmaz, A. Atmanli, and F. M. Vigil, "Quaternary blends of diesel, biodiesel, higher alcohols and vegetable oil in a compression ignition engine", *Fuel*, 2018, 212, 462e9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.050>
- [66] D. Babu and R. Anand, "Effect of biodiesel-diesel-n-pentanol and biodiesel-diesel-n-hexanol blends on diesel engine emission and combustion characteristics", *Energy*, 2017a, 133, 761-776. DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.103
- [67] Y. Chen, J. Ma, B. Han, P. Zhang, H. Hua, H. Chen, and X. Su, "Emissions of automobiles fueled with alternative fuels based on engine technology: A review", *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English edition)*, 2018, vol. 5, no. 4, August 2018, 318-334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.05.001>
- [68] S. Raviteja and G. N. Kumar, "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*, 2015, 40(30), 9563e9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.171>
- [69] T. Kim and S. Lee, "Combustion and emission characteristics of wood pyrolysis oil-butanol blended fuels in a DI diesel engine", *International Journal of Automotive Technology*, 2015, 16, 903-912. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-015-0092-4>
- [70] P. Hellier, L. Al-Haj, M. Talibi, S. Purton, and S. Ladommatos, "Combustion and emissions characterization of terpenes with a view to their biological production in cyanobacteria", *Fuel*, 2013, 111, 670e88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.042>
- [71] B. J. Bora and U. Saha, "Comparative assessment of a biogas run dual fuel diesel engine with rice bran oil methyl ester, pongamia oil methyl ester and palm oil methyl ester as pilot fuels", *Renewable Energy*, 2015, 81, 490-498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.019>
- [72] Y. Noorollahi, M. Azadbakht, and B. Ghobadian, "The Effect of Different Diesterol (Diesel-Biodiesel-Ethanol) Blends on Small Air-Cooled Diesel Engine Performance and Its Exhaust Gases", *Energy*, 2017, 142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.024>
- [73] G. Khoobakht, M. Karimi, and K. Kheiralipour, "Effects of biodiesel-ethanol-diesel blends on the performance indicators of a diesel engine: A study by response surface modeling", *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 148, 1385-1394, ISSN 1359-4311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.025>
- [74] A. Paul, R. Panua, and D. Debroy, "An experimental study of combustion, performance, exergy and emission characteristics of a CI engine fueled by diesel-ethanol-biodiesel blends", *Energy*, 2017, 141, 839-852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.137>
- [75] M. Parthasarathy, J. Isaac Joshua Ramesh Lalvani, B. Dhinesh, and K. Annamalai, "Effect of hydrogen on ethanol-biodiesel blend on performance and emission characteristics of a direct injection diesel engine", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 134, 433-439. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.11.005
- [76] R. Senthilraja, V. Sivakumar, K. Thirugnanasambandham, and N. Nedunchezian, "Performance, emission and combustion characteristics of a dual fuel engine with Diesel-Ethanol-Cotton seed oil Methyl ester blends and Compressed Natural Gas (CNG) as fuel", *Energy*, 2016, 112, 899e907. DOI: 10.1016/j.energy.2016.06.114
- [77] T. Sathish, V. Mohanavel, M. Arunkumar, K. Rajan, M. Elahi, M. Soudagar, M. A. Mujtaba, S. H. Salmen, S. A. Obaid, H. Fayaz, and S. Sivakumar, "Utilization of Azadirachta indica biodiesel, ethanol and diesel blends for diesel engine applications with engine emission profile", *Fuel*, 2022, vol. 319, 123798, ISSN 0016-2361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123798>

- [78] L. Zhu, C. S. Cheung, W. G. Zhang, and Z. Huang, "Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanolbiodiesel blends", *Fuel*, 2011, 90, 1743e50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.024>
- [79] H. Aydın and C. İlkılıç, "Effect of ethanol blending with biodiesel on engine performance and exhaust emissions in a CI engine", *Appl Therm Eng*, 2010, 30, 1199e204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.037>
- [80] D. B. Hulwan and S. V. Joshi, "Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel-ethanol-biodiesel blends of high ethanol content", *Applied Energy*, 2011, vol. 88, no. 12, 5042-5055, ISSN 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.008>
- [81] C. Zhan, Z. Feng, W. Ma, M. Zhang, C. Tang, and Z. Huang, "Experimental investigation on effect of ethanol and di-ethyl ether addition on the spray characteristics of diésel / biodiesel blends under high injection pressure", *Fuel*, 2018, 218, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.038>
- [82] A. O. Emiroğlu and M. Şen, "Combustion, performance and exhaust emission characterizations of a diesel engine operating with a ternary blend (alcohol- biodieseldiesel fuel)", *Appl. Therm. Eng.*, 2018, 133, 371-380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.069>
- [83] S. A. Shahir, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, A. Imran, I. M. R. Fattah, and A. Sanjid, "Feasibility of diesel – biodiesel – ethanol / bioethanol blend as existing CI engine fuel: an assessment of properties, material compatibility, safety and combustion", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014, 32, 379-395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.029>
- [84] V. Soloiu, M. Duggan, H. Ochieng, S. Harp, J. Weaver, C. Jenkins, and B. Vlcek. "Premixed charge of n-butanol coupled with direct injection of biodiesel for an advantageous soot-NOX trade-off", *SAE Technical Paper*, 2013, 01, 0916. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-0916>
- [85] S. S. Prabu, M. A. Asokan, R. Roy, S. Francis, and M. K. Sreelekh, "Performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled with waste cooking oil bio-diesel/diesel blends with additives", *Energy*, 2017, 122:638e48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.119>
- [86] G. Tóccar, T. Özgör, and K. Aydın, "Effect of diesel-microalgae biodiesel-butanol blends on performance and emissions of diesel engine", *Fuel*, 2014, 132, 47-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.074>
- [87] V. M. Babu, K. Madhu Murthy, and G. Amba Prasad Rao, "Butanol and pentanol: The promising biofuels for CI engines – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*, 2017b, vol. 78(C), 1068-1088. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.038>
- [88] Z.-H. Zhang and R. Balasubramanian, "Investigation of particulate emission characteristics of a diesel engine fueled with higher alcohols/biodiesel blends", *Appl Energy*, 2016a, 163, 71-80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.173>
- [89] D. Damodharan, A. P. Sathiyagnanam, D. Rana, B. Rajesh Kumar, and S. Saravanan, "Extraction and characterization of waste plastic oil (WPO) with the effect of nbutanol addition on the performance and emissions of a DI diesel engine fueled with WPO/diesel blends", *Energy Convers Manage*, 2017, 131, 117-26. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.076>
- [90] M. Lapuerta, J. Rodríguez-Fernández, D. Fernández-Rodríguez, and R. Patino-Camino, "Cold flow and filterability properties of n -butanol and ethanol blends with diesel and biodiesel fuels", *Fuel*, 2018, 224:552e9.
- [91] J. Ravikumar and S. Saravanan, "Performance and emission analysis on blends of diesel, restaurant yellow grease and n-pentanol in direct-injection diésel engine", *Environ Sci Pollut Control Ser*, 2017, 24(6):5381e90. DOI: 10.1007/s11356-016-8298-1
- [92] R. Dhanasekaran, V. Krishnamoorthy, D. Rana, S. Saravanan, A. Nagendran, and B. R. Kumar, "A sustainable and eco-friendly fueling approach for directinjection diesel engines using restaurant yellow grease and n-pentanol in blends with diesel fuel", *Fuel*, 2017, 193, 419-431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.030>
- [93] K. Yang, L. Wei, C. S. C. Cheunga, C. Tang, and Z. Huang, "The effect of pentanol addition on the particulate emission characteristics of a biodiesel operated diesel engine", *Fuel*, 2017, 209, 132-140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.093>
- [94] R. Sridhar, J. Jeevahan, and M. Chandrasekaran, "Effect of the addition of 1-pentanol on engine performance and emission characteristics of diesel and biodiesel fuelled single cylinder diésel engine", *International Journal of Ambient Energy*, 2018. DOI: 10.1080/01430750.2018.1443505
- [95] B. Yang, X. Wei, C. Xi, Y. Liu, K. Zeng, and M.-C. Lai, "Experimental study of the effects of natural gas injection timing on the combustion performance and emissions of a turbocharged common rail dual-fuel engine", *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 87, 297-304, ISSN 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.030>
- [96] A. Paul, R. S. Panua, D. Debroy, and P. K. Bose, "An experimental study of the performance, combustion and emission characteristics of a CI engine under dual fuel mode using CNG and oxygenated pilot fuel blends", *Energy*, 2015, 86:560e73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.050>
- [97] M. Karabektas, G. Ergen, and M. Hosoz, "The effects of using diethylether as additive on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with CNG", *Fuel*, 2014, 115, 855-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.062>
- [98] J. Devaraj, Y. Robinson, and P. Ganapathi, "Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of waste plastic pyrolysis oil blended with diethyl ether used as fuel for diesel engine", *Energy*, 2015, vol. 85, 1 June 2015, 304-309. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.075>
- [99] V. K. Kaimal and P. Vijayabalan, "An investigation on the effects of using DEE additive in a DI diesel engine fuelled with waste plastic oil", *Fuel*, 2016, 180, 90-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.030>
- [100] R. Hosmath, N. Banapurmath, S. Khandal, V. Gaitonde, Y. H. Basavarajappa, and V. Yaliwal, "Effect of compression ratio, CNG flow rate and injection timing on the performance of dual fuel engine operated on honge oil methyl ester (HOME) and compressed natural gas (CNG)", *Renewable Energy*, 2016, 93, 579-590. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.010>
- [101] S. K. Kumar, H. Shergill, and A. Kumar, "Study The Performance Characteristics Of Acetylene Gas In Dual Fuel Engine With Diethyl Ether Blends", *International Journal on Emerging Technologies*, 2012, 3(1), 80-83.
- [102] K. Ramalingam, A. Kandasamy, L. Subramani, D. Balasubramanian, and J. P. Thadhani, "An assessment of combustion, performance characteristics and emission control strategy by adding anti-oxidant additive in emulsified fuel", *Atmospheric Pollution Research*, 2018, vol. 9, no. 5, 959-967. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.02.007>
- [103] N. Yilmaz, F. M. Vigil, K. Benalil, S. M. Davis, and A. Calva, "Effect of biodiesel-butanol fuel blends on emissions and performance characteristics of a diesel engine", *Fuel*, 2014, 135, 46-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.022>
- [104] G. R. Kannan and R. Anand, "Experimental investigation on diesel engine with diestrolwater micro emulsions", *Energy*, 2011, 36, 1680-7.
- [105] N. A. Mukhtar, F. Y. Hagos, A. R. A. Aziz, A. A. Abdulah, and Z. A. A. Karim, "Combustion characteristics of tri-fuel (diesel-ethanol-biodiesel) emulsion fuels in CI engine with micro-explosion phenomenon attributes", *Fuel*, 2022, vol. 312, 122933, ISSN 0016-2361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122933>
- [106] I. Örs, S. Sarikoc, A. Atabani, S. Ünalán, and S. Akansu, "The effects on performance, combustion and emission characteristics of DICI engine fuelled with TiO₂ nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends", *Fuel*, 2018, vol. 234, 15 December 2018, 177-188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.024>

- [107] H. Venu and V. Madhavan, "Effect of Al₂O₃ nanoparticles in biodiesel-diesel-ethanol blends at various injection strategies: performance, combustion and emission characteristics", *Fuel*, 2016, 186, 176-189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.046>
- [108] T. Shaafi and R. Velraj, "Influence of alumina nanoparticles, ethanol and isopropanol blend as additive with diesel-soybean biodiesel blend fuel: combustion, engine performance and emissions", *Renew. Energy*, 2015, 80, 655-663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.042>
- [109] A. M. Selvan, R. B. Anand, and M. Udayakumar, "Effect of Cerium Oxide Nanoparticles and Carbon Nanotubes as Fuel-Borne Additives in Diesterol blends on the performance, combustion and emission characteristics of a variable compression ratio engine", *Fuel*, 2014, 130, 160-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.034>

Citación del artículo:

H.H Riojas-González, I. Reta-Heredia, L. J. Bortoni-Anzures, J. J. Martínez-Torres, "Análisis de la mezcla de alcoholes en motor diésel", *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 51, no. 3, pp. 34-44, 2022. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v51n3.106796>