

Estado de la publicación: El preprint no ha sido enviado para publicación

El Hidrogeno en su producción, almacenamiento y combustión de motores

Héctor Hugo Riojas González, Hiram Herrera-Rivas, Rubén Machucho Cadena

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.9685>

Enviado en: 2024-08-28

Postado en: 2025-05-15 (versión 3)

(AAAA-MM-DD)

La moderación de este preprint recibió lo endoso de:

Daniela Cruz Delgado (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0289-7483>)

Justificación de la versión: Se actualiza la información y el contenido del tema

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

Hidrogeno y el alcohol como combustión de motores

The use of hydrogen and alcohol in engine combustion

Héctor Hugo Riojas-González^{1*}, email: hriojasg@upv.edu.mx, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-2401-1110>

Hiram Herrera-Rivas¹, email: hherrerar@upv.edu.mx, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-2650-8932>

Rubén Machucho-Cadena¹, email: rmachuchoc@upv.edu.mx, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-5731-6677>

Resumen

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: Hidrogeno, alcohol, motores, producción, metano, mezcla

Abstract

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: Hydrogen, alcohol, engines, production, methane, mixture

* Autor para correspondencia:

Héctor Hugo Riojas González, hriojasg@upv.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2401-1110>

¹ Universidad Politécnica de Victoria, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

Introducción

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

Metodología

Los criterios de este estudio que especifican las características metodológicas de la población, se denominan criterios de elegibilidad o de selección. Estos criterios son los de inclusión, exclusión y eliminación, que delimitan la población elegible, la finalidad de esta investigación es exponer las opciones y alternativas que se pueden aplicar en los motores, para poder usarlos con el hidrogeno. Se utilizó para el análisis bibliométrico los artículos científicos de la base de datos SCOPUS y Science direct. Para el procesamiento y visualización de los datos, se utilizaron los programas Ucinet y Bibexcel, respectivamente.

Resultados

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 H₂ (hidrogeno) (Zhen et al 2015). Para la producción industrial del etanol existen dos vías principales, las cuales se presentan en la Figura 3.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

De acuerdo con Kleinert et al (2008), analizaron una técnica de biorrefinería en la producción de etanol a partir de carbohidratos lignocelulosicos, en donde los autores encontraron que al pirolizar la lignina de la producción de etanol resulta de más alta calidad que la pirolisis líquida cruda (Hossain et al 2013), en la Figura 4 se observa la producción de etanol por vía biorrefinería. 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 lignocelulósica (Saxena et al 2016). Actualmente la unión europea está considerando bio-DME por su potencial de biocombustible en el 2030, el grupo Volvo es el coordinador del proyecto bio-DME para el programa de la unidad europea (Saxena et al 2016). También está el caso del MTBE (éter metil tert-butílico) el cual es un compuesto orgánico volátil fabricado por la reacción química del isobutileno y el metanol (Awad et al 2018). Este es el combustible de éter más utilizado debido a su bajo costo, facilidad de producción y características favorables de transferencia y mezcla (Awad et al 2018). El etanol y el MTBE obtienen como subproducto el aceite de fusel el cual se genera a través de la fermentación de algunos productos agrícolas los cuales tienen propiedades similares al combustible alcohólico, estas propiedades incluyen un alto número de octano, alto contenido de oxígeno y punto de ebullición (Awad et al 2018). Finalmente se encuentra el DEE (éter dielítico) el cual se puede producir a partir del etanol a un costo aceptable y de naturaleza renovable, la alta volatilidad de DEE evita el bloqueo de vapor en la línea de inyección del combustible (Hariharan et al 2013).

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 NO_x (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 hidrógeno (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 NO_x se incrementó. Otro estudio sobre este tema lo presentó 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

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

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 oxígeno de etanol. En estudios que aplican el metanol en sus experimentos, está el caso de Zhang et al (2014a), en donde analizaron en un motor la mezcla de metanol con 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 CO₂ (dióxido de carbono) y NOx. De acuerdo con Raviteja et al (2015), analizaron el rendimiento de un motor SI utilizando butanol, etanol, gasolina y H₂, la adición de hidrogeno al butanol-etanol mejora el proceso de combustión, amplía el rango de inflamabilidad de la mezcla y reduce las emisiones. Un estudio de una serie de mezclas la realizó Gautam et al (2000), donde evaluó las mezclas de alcohol-gasolina, incluyendo metanol, etanol, propanol, butanol, pentanol y gasolina, demostró que cuanto más es el contenido de oxígeno en mezclas de alcohol y gasolina mejor es la resistencia al golpe y más rápida es la velocidad de combustión. En la investigación de Calam et al (2015), analizaron las mezclas con el aceite de fusel, como resultado de su estudio se pudo aumentar el octanaje a medida que aumentaba la cantidad de fusel, lo cual es deseable ya que permite mejorar la eficiencia del motor, pero también aumenta el BSFC. Finalmente, una aplicación de mezcla de alcohol con gasolina se presentó en el 2006 con la filial brasileña de Fiat la cual introdujo el combustible Fiat siena Tetra, un automóvil de 4 combustibles desarrollada por Fiat de Brasil, este automóvil puede funcionar con etanol al 100% con mezcla de gasolina y etanol al 25%, con pura gasolina y gas natural y puede cambiar de la mezcla de gasolina y etanol a gas natural comprimido automáticamente, dependiendo de la potencia requerida por las condiciones del camino (Saxena et al 2016). La tecnología puede ayudar a mejorar el uso de biocombustibles está el caso del sistema de doble inyección gasolina-biocombustible en el motor de chispa en el cual está conformado de dos inyecciones por separado, el cual consiste en un inyector de puerto y un inyector directo, con la finalidad de lograr una mayor

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

flexibilidad de combustible, considerando la demanda del motor y la disponibilidad del combustible para el vehículo (Yamasaki et al 2013).

Los combustibles a base de alcohol han generado un gran interés en motor diésel en donde se han aplicado en numerosos estudios tales como el etanol, metanol, butanol, pentanol y el hexanol, siendo una alternativa atractiva para satisfacer la demanda energética y reducir las emisiones (Shahir et al 2015, Zhang et al 2016). Los alcoholes pueden usarse en motores CI ya sea a través de fumigación con alcohol en inyección de combustible dual, como mezcla de alcohol con diésel y como emulsión alcohol-diésel (Satsangi et al 2018).

Relación del porcentaje de dosis del bioalcohol en el motor CI

La utilización del metanol y el etanol como combustible alternativo en motores diésel ha sido ampliamente investigado y se ha demostrado desafortunadamente que su uso resulta en un deterioro en el rendimiento del motor, especialmente cuando la mezcla supera el 10%, en contraste el uso de alcoholes superiores como el n-butanol y el 1-pentanol, los cuales se pueden usar con mezclas de diésel y lograr hasta con un 40% en mezcla abasteciendo a los motores diésel (Atmanli et al 2018). De acuerdo con el autor Campos-Fernández et al (2012), señalaron que el 1-pentanol se puede agregar hasta con un 25% en volumen sin problemas en el rendimiento del motor logrando un aumento de BTE, pero generando también un ligero incremento de BSFC. En la Tabla 1 se muestra la porción 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

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

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

del alcohol isopropílico y los resultados sugirieron una reducción de NO_x y un ligero aumento de BTE, sin embargo, las emisiones de HC fueron más altas, pero se logró una disminución de CO₂, en otra investigación de Kumar et al 2016, analizaron los efectos del n-octanol con mezclas de diésel y encontraron que la adición de n-octanol mejora el BTE y genera menores emisiones de humo, NO_x, HC y CO. En el estudio de Campos-Fernández et al 2012 y 2013, realizaron pruebas con un motor Perkins DI CI en mezcla de pentanol (10-25%) con diésel, los resultados mostraron que hubo una mejora en el BTE con el aumento en el contenido del pentanol, lo cual podría atribuirse a una mayor eficiencia de combustión, generando una tasa de liberación de calor rápida, mayor fase de combustión premezclada y reducción en las pérdidas de calor, esto último es debido a la presencia del oxígeno y al menor punto de ebullición del pentanol. Un análisis de varios alcoholes fue realizado por Atmanli et al., (2016), en donde analizaron el rendimiento del motor y las emisiones de un motor diésel alimentado con: diésel, biodiesel, propanol, n-butanol y 1-pentanol en un motor diésel de inyección indirecta, bajo una velocidad constante del motor de 1800 rpm en cuatro cargas del motor. Los resultados mostraron que la mezcla con propanol tenía mayor BSFC, mientras el n-butanol tuvo el mayor BTE, en el caso de las emisiones, todas las mezclas causaron un aumento de CO, mientras que las emisiones de HC se redujeron significativamente con n-butanol y con 1-pentanol, finalmente la mezcla de 1-pentanol tuvo las menores emisiones de NO_x. Otro trabajo similar lo desarrollaron Yilmaz et al 2016, en donde investigaron el rendimiento y las emisiones en un motor de 4 cilindros de inyección indirecta motor diésel con una velocidad de giro de 1800 rpm y analizaron la mezcla (10%) de propanol, n-butanol y 1-pentanol, mezclado con biodiesel de aceite de desecho éster metílico, solo la mezcla de 1-pentanol tuvo un ligero aumento de BTE, el resto de los alcoholes tuvieron una reducción, en lo que respecta a las emisiones todos los combustibles mezclados tuvieron un menor contenido de CO y NO_x en comparación con el aceite de desecho éster metílico, mientras que la mezcla de 1-pentanol tuvo las menores emisiones de HC de todos los combustibles probados. Finalmente, en el estudio de Kumar et al 2016, examinaron el impacto de varias mezclas de alcohol con diésel en motor de un solo cilindro, de aspiración natural, velocidad constante (1500 rpm) motor diésel de inyección directa de 4 tiempos con 4 cargas, los combustibles analizados fueron mezclas de 30% de iso-butanol, n-pentanol, n-hexanol y n-octanol mezclados con diésel ultra-bajo en azufre puro (ULSP). Los resultados revelaron que la mezcla de iso-butanol tenía el mayor retraso de encendido, los picos más altos de presión y la duración más corta de la combustión. En lo que respecta a las emisiones observaron que en la mezcla de iso-butanol tenía el humo más bajo de opacidad y los niveles más bajos de NO y CO pero con un incremento de emisiones de HC en comparación a otros combustibles, el valor de HC más bajo lo registro la mezcla de n-octanol. En la Tabla 2 se presenta el desempeño del motor aplicando butanol.

Tabla 2.

Desempeño del motor CI con n-butanol en mezcla

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

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

No

Mejor eficiencia de combustión, aumento el BTE y redujo el BSFC

Campos-Fernández
et al 2012

El efecto de la inyección del bioalcohol en motor CI

El sistema de inyección del motor está diseñado al petrodiesel convencional, por lo que usar bioalcoholes agrega más complejidad al proceso, por lo que puede implicar un diseño de inyector, una bomba de alimentación para el bioalcohol y una alta presión de bomba de inyección modificada para el biocombustible (Park et al 2014). De acuerdo con los estudios de Chen et al (2017) y Li et al (2016), investigaron los efectos de los parámetros de inyección de diésel en la combustión rápida para una combustión dual diésel-metanol. Los resultados experimentales mostraron que los parámetros de inyección del diésel afectan la fracción de combustión rápida en gran medida, por lo que aumenta a medida que la presión de inyección de diésel se incrementa. En el caso del estudio de Yao et al 2010, analizaron en un motor diésel turbo-reforzado de inyección directa mezclas con n-butanol con diésel. Reportaron un aumento de BSFC con mezclas de n-butanol y esto se le atribuye al bajo poder calorífico, sin embargo, se tuvo una reducción de hollín y CO, tal reducción se le atribuye a una duración de inyección relativamente más larga en comparación con el diésel, en la Tabla 3 se observa la relación de compresión óptima de acuerdo al tipo de alcohol aplicado.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

Declaración de la contribución de los autores

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo. El porcentaje total de contribución para la conceptualización, preparación y corrección de este artículo fue el siguiente: H.H.R.G 50 %, H.H.R 25 % y R.M.C. 25 %

Declaración de disponibilidad de los datos

Los datos que respaldan los resultados de este estudio serán puestos a disposición por el autor correspondiente H.H.R.G., previa solicitud razonable.

Referencias

- Abdelaal, M.M., Rabee, B.A., Hegab, A.H. (2013). Effect of adding oxygen to the intake air on a dual-fuel engine performance, emissions, and knock tendency. *Energy*; 61:612–20. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.022>
- Al-Rousan, A.A. (2010). Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold. *Int J. Hydrogen Energy*; 35:12930-5. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.144>
- Aydin, K., Kenanoğlu, R. (2018). Effects of hydrogenation of fossil fuels with hydrogen and hydroxy gas on performance and emissions of internal combustion engines, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 43, Issue 30, Pages 14047-14058, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.026>.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

- Babu, M.K.G., Subramanian, K.A. (2013). Alternative transportation fuels, utilisation in combustion engines. *CRC Press, Taylor & Francis Group* (1st ed.).
<https://doi.org/10.1201/b14995>
- Baghdadi, Al M.A.S. (2003). Hydrogeneethanol blending as an alternative fuel for spark ignition engines. *Renew Energy J*; 28:1471-8. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00188-X](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00188-X)
- Bailera, M., Lisbona, P., Romeo, L.M., Espatolero, S. (2017). Power to gas projects review: lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 69; 292–312. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.130>
- Balat, H., Kirtay, E. (2010). Hydrogen from biomass – Present scenario and future prospects, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 35, Issue 14, Pages 7416-7426, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.137>.
- Baratta, M., d'Ambrosio, S., Iemmolo, D., Misul, D. (2017). Method for the recognition of the fuel composition in CNG engines fed with natural gas/biofuel/hydrogen blends, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Volume 40, Pages 312-326, ISSN 1875-5100, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.01.027>.
- Bassiony, M.A., Ibrahim, A., El-Kassaby, M.M. (2016). An experimental study on the effect of using gas-to-liquid (GTL) fuel on diesel engine performance and emissions, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 55, Issue 3, Pages 2115-2124, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.06.026>.
- Bromberg, L., Cohn, D.R., Hadidi1, K., Heywood, J.B., Rabinovich, A. (2004). Plasmatron fuel reformer development and internal combustion engine vehicle applications. *Diesel Engine Emission Reduction (DEER) Workshop*, PSFC-JA-05-22.
- Chintala, V., Subramanian, K.A. (2014). Assessment of maximum available work of a hydrogen fueled compression ignition engine using exergy analysis. *Energy*; 67:162–75. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.094>
- Chintala, V., Subramanian, K.A. (2015). Experimental investigations on effect of different compression ratios on enhancement of maximum hydrogen energy share in a compression ignition engine under dual-fuel mode. *Energy*; 87:448–62. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.014>
- Chintala, V., Subramanian, K.A. (2017). A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 70, Pages 472-491, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.247>.
- Choi, G.H., Chung, Y.J., Han, S.B. (2005). Performance and emissions characteristics of a hydrogen enriched LPG internal combustion engine at 1400 rpm. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(1), pp. 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.06.009>
- Chraplewska, N., Duda, K., Meus, M. (2011). Evaluation of usage brown gas generator for aided admission of diesel engine with fermentative biogas and producer gas. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 18, No. 3, 53-60.
- Christodoulou, F., Megaritis, A. (2013). Experimental investigation of the effects of separate hydrogen and nitrogen addition on the emissions and combustion of a diesel engine. *Int J Hydrogen Energy*; 38(24):10126–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.173>

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

- Christodoulou, F., Megaritis, A. (2014). The effect of reformer gas mixture on the performance and emissions of an HSDI diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 39, Issue 18, Pages 9798-9808, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.090>.
- Comotti, M., Frigo, S. (2015). Hydrogen generation system for ammonia–hydrogen fuelled internal combustion engines, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 40, Issue 33, Pages 10673-10686, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.080>.
- Cracknell, R.F., Kramer, G.J., Vos, E. (2004). Designing fuels compatible with reformers and internal combustion engines. *SAE Transactions* 113: 1092–99. <http://www.jstor.org/stable/44740829>.
- Dimitriou, P., Tsujimura, T. (2017). A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 38, Pages 24470-24486, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.232>.
- ENEAC consulting. (2016). “The Potential of Power-to-gas”, Technology Review and Economic Potential Assessment, <http://www.eneacconsulting.com/wp-content/uploads/2016/01/ENEAC-Consulting-Thepotential-of-power-to-gas.pdf>.
- Fayaz, H., Saidur, R., Razali, N., Anuar, F.S., Saleman, A.R., Islam, M.R. (2012). An overview of hydrogen as a vehicle fuel. *Renew Sust Energy Rev*; 16(8):5511–28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.012>
- Gómez, J.P., Olsen, D.B., Amell, A.A. (2018). Engine operation just above and below the knocking threshold, using a blend of biogas and natural gas. *Energy*, Volume 153, Pages 719-725, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.079>.
- Guo, H.S., Hosseini, V., Neill, W.S., Chippior, W.L., Dumitrescu, C.E. (2011). An experimental study on the effect of hydrogen enrichment on diesel fueled HCCI combustion. *Int J Hydrogen Energy*; 36:13820–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.143>
- Hairuddin, A.A., Yusaf, T., Wandel, A.P. (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>.
- Hashimoto, K., Yamasaki, M., Fujimura, K., Matsui, T., Izumiya, K., Komori, M., El-Moneim, A.A., Akiyama, E., Habazaki, H., Kumagai, N., Kawashima, A., Asami, K. (1999). Global CO₂ recycling- novel materials and prospect for prevention of global warming and abundant energy supply, *Mater. Sci. Eng.* 267(2); 200-206. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00092-1)
- Hegab, A., La Rocca, A., Shayler, P. (2017). Towards keeping diesel fuel supply and demand in balance: Dual-fuelling of diesel engines with natural gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 70, Pages 666-697, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.249>.
- Hirscher, M. (2010). Handbook of hydrogen storage, new materials for future energy storage. *Weinheim: Wiley-VCH*; ISBN 9783527322732. DOI:10.1002/9783527629800
- Homan, H.S., Reynolds, R.K., De Boer, P.C.T., McLean, W.J. (1979). Hydrogen-fueled diesel engine without timed ignition. *Int J Hydrogen Energy*; 4(4):315-25. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(79\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0360-3199(79)90006-5)

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

- Huang, D.Y., Lin, B.F., Jang, J.H. (2015). Emission of internal combustion with low temperature plasma reformer, *Energy Procedia.*, 75, pp. 3036-3041. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.618>
- Huang, D.-Y., Jang, J.-H., Lin, P.-H., Chen, B.-H. (2017). Effect of ignition timing on the emission of internal combustion engine with syngas containing hydrogen using a spark plug reformer system. *Energy Procedia*, Volume 105, Pages 1570-1575, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.499>.
- Ikegami, M., Miwa, K., Shioji, M. (1982). A study of hydrogen fuelled compression ignition engines. *Int J Hydrogen Energy*; 7(4):341-53. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(82\)90127-6](https://doi.org/10.1016/0360-3199(82)90127-6)
- Jamal, Y., Wyszynski, M. (1994). On-board generation of hydrogenrich gaseous fuels e a review. *Int J Hydrogen Energy*; 19:557-72. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(94\)90213-5](https://doi.org/10.1016/0360-3199(94)90213-5)
- Jemni, M.A., Kassem, S.H., Driss, Z., Abid, M.S. (2018). Effects of hydrogen enrichment and injection location on in-cylinder flow characteristics, performance and emissions of gaseous LPG engine. *Energy*, Volume 150, Pages 92-108, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.120>.
- Kabashima, H., Einaga, H., Futamura, S. (2001). Hydrogen generation from water, methane, and methanol with nonthermal plasma. *IEEE Industry Applications Society*, 1, pp. 680-685. DOI: 10.1109/IAS.2001.955493
- Karim, G.A. (2003). Combustion in gas fueled compression ignition engines of the dual fuel type. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 125(3): 827-836, <https://doi.org/10.1115/1.1581894>
- Karim, G.A. (2003a). Hydrogen as a spark ignition engine fuel. *Int J Hydrog Energy*; 28(5):569–577. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00150-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00150-7)
- Klell, M., Eichlseder, H., Sartory, M. (2012). Mixtures of hydrogen and methane in the internal combustion engine – Synergies, potential and regulations. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, Issue 15, Pages 11531-11540, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.067>.
- Kojima, H., Matsumoto, H., Tsujimura, T. (2017). Development of large scale unified system for hydrogen energy carrier production and utilization: Experimental analysis and systems modeling. *Int J Hydrogen Energy*; 42(19):13444-53. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.088>
- Korakianitis, T., Namasivayam, A.M., Crookes, R.J. (2011). Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 37, Issue 1, Pages 89-112, ISSN 0360-1285, <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2010.04.002>.
- Köse, H., Ciniviz, M. (2013). An experimental investigation of effect on diesel engine performance and exhaust emissions of addition at dual fuel mode of hydrogen. *Fuel Process Technol*; 114:26–34. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.03.023>
- Lata, D.B., Misra, A., Medhekar, S. (2011). Investigations on the combustion parameters of a dual fuel diesel engine with hydrogen and LPG as secondary fuels. *Int J Hydrog Energy*; 36(21):13808–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.142>
- Lee, J.T., Kim, Y.Y., Lee, C.W., Caton, J.A. (2001). An investigation of a cause of backfire and its control due to crevice volumes in a hydrogen fueled engine. *J Eng Gas Turbines Power*; 123(1):204-210. <https://doi.org/10.1115/1.1339985>

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

- Liew, C., Li, H., Liu, S., Besch, M.C., Ralston, B., Clark, N., Huang, Y. (2012). Exhaust emissions of a H₂- enriched heavy-duty diesel engine equipped with cooled EGR and variable geometry turbocharger. *Fuel*; 91(1):155–163. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.08.002>.
- Luo, Q.H., Sun, B.G. (2016). Inducing factors and frequency of combustion knock in hydrogen internal combustion engines. *Int J Hydrogen Energy*; 41(36):16296-305. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.257>
- Ma, F., Wang, Y., Liu, H., Li, Y., Wang, J., Ding, S. (2008). Effects of hydrogen addition on cycle-by-cycle variations in a lean burn natural gas spark-ignition engine. *Int J Hydrogen Energy*; 33(2):823–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.10.043>
- Masjuki, H.H., Ruhul, A.M., Mustafi, N.N., Kalam, M.A., Arbab, M.I., Fattah, I.M.R. (2016). Study of production optimization and effect of hydroxyl gas on a CI engine performance and emission fueled with biodiesel blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 41, Issue 33, Pages 14519-14528, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.273>.
- Mathur, H.B., Das, L.M., Patro, T.N. (1993). Hydrogen-fuelled diesel engine: performance improvement through charge dilution techniques. *Int J Hydrog Energy*; 18(5):421–31. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(93\)90221-U](https://doi.org/10.1016/0360-3199(93)90221-U)
- Mehra, R.K., Duan, H., Juknelevičius, R., Ma, F., Li, J. (2017). Progress in hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG) internal combustion engines - A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 80, Pages 1458-1498, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.061>.
- Merkisz, J., Pielecha, I. (2004). Alternatywne paliwa i układy napędowe pojazdów, Wydaw. Politechniki Poznańskiej, Poznań, ISBN: 83-7143-209-7
- Najjar, Y.S.H. (2013). Hydrogen safety: the road toward green technology. *Int J Hydrogen Energy*; 38:10716–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.126>
- Ni, M., Leung, M.K.H., Sumathy, K., Leung, D.Y.C. (2004). Water electrolysis—a bridge between renewable resources and hydrogen. *Proceedings of the International Hydrogen Energy forum*, vol. 1, 25-28, Beijing, PRC. pp. 4
- Okada, Y., Shimura, M. (2013). Development of large-scale H₂ storage and transportation technology with liquid organic hydrogen carrier (LOHC). In: *Proceeding of The 21st Joint GCC-Japan Environment Symposium*, Doha, Qatar.
- Ozcanli, M., Akar, M., Calik, A., Serin, H. (2017). Using HHO (Hydroxy) and hydrogen enriched castor oil biodiesel in compression ignition engine. *Int J Hydrogen Energy*; 42(36):23366-72. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.091>.
- Park, C., Park, S., Lee, Y., Kim, C., Lee, S., Moriyoshi, Y. (2011). Performance and emission characteristics of a SI engine fueled by low calorific biogas blended with hydrogen. *Int J Hydrog Energy*; 36(16):10080–10088. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.018>
- Park, C., Park, S., Kim, C., Lee, S. (2012). Effects of EGR on performance of engines with spark gap projection and fueled by biogas–hydrogen blends. *International Journal of Hydrogen Energy*. 37. 14640–14648. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.080.
- PiĆtak, A., Radkowski, S. (2011). Methane – A Fuel for Agriculture, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 18, No. 4, 357-368. <https://kones.eu/ep/2011/vol18/no4/44.pdf>

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

- Prabhukumar, G.P., Swaminathan, S., Nagalingam, B., Gopalakrishnan, K.V. (1987). Water induction studies in a hydrogen-diesel dual-fuel engine. *Int J Hydrog Energy*; 12(3):177–186. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(87\)90151-0](https://doi.org/10.1016/0360-3199(87)90151-0)
- Rahman, S.M.A., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Abedin, M.J., Sanjid, A., Sajjad, H. (2013). Production of palm and Calophyllum inophyllum based biodiesel and investigation of blend performance and exhaust emission in an unmodified diesel engine at high idling conditions. *Energy Convers Manag*; 76:362-7. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.061>
- Rieke, S. (2015). CO₂ reutilization in Industrial Projects e State of Art and Realization of Concrete Projects for the Production of Renewable Methane and Solid Products Based on CO₂, *EMRS spring meeting*, http://www.ceops-project.eu/sites/default/files/documents/ceops_ws_5._rieke.pdf.
- Rosha, P., Dhir, A., Mohapatra, S.K. (2018). Influence of gaseous fuel induction on the various engine characteristics of a dual fuel compression ignition engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 82, Part 3, Pages 3333-3349, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.055>.
- Rubio, M.G.A., Jaojaruek, K. (2015). Hydrogen – The Future Fuel. *Advances in Automobile Engineering*, 4: 116. doi:10.4172/2167-7670.1000116
- Samuel, S., McCormick, G. (2010). Hydrogen enriched diesel combustion, *SAE Technical Paper* 2010-01-2190, 2010, <https://doi.org/10.4271/2010-01-2190>.
- Saravanan, N., Nagarajan, G. (2008). An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine. *Int J. Hydrogen Energy*, 33(6), 1769-1775. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.12.065>
- Scamman, D., Newborough, M. (2016). Using surplus nuclear power for hydrogen mobility and power-to-gas in France, *Int. J. Hydrogen Energy*, 41(24); 10080–10089. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.166>
- Schüth, F., Palkovits, R., Schlögl, R., Sub, D.S. (2012). Ammonia as possible element in an energy infrastructure: catalysts for ammonia decomposition. *Energy Environ Sci*; 5:6278-89. <https://doi.org/10.1039/C2EE02865D>
- Szwaja, S., Grab-Rogalinski, K. (2009). Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *Int J Hydrogen Energy*; 34(10):4413–4421. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.020>
- Szwaja, S., Naber, J.D. (2013). Dual nature of hydrogen combustion knock. *Int J Hydrogen Energy*; 38(28):12489–12496. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.036>
- Tartakovsky, L., Baibikov, V., Veinblat, M. (2013). Comparative performance analysis of SI engine fed by ethanol and methanol reforming products. *SAE Technical Paper* 2013-01-2617, <https://doi.org/10.4271/2013-01-2617>.
- Thangaraj, S., Govindan, N. (2018). Evaluating combustion, performance and emission characteristics of diesel engine using karanja oil methyl ester biodiesel blends enriched with HHO gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 43, Issue 12, Pages 6443-6455, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.036>.
- Torregrosa, A.J., Broatch, A., Novella, R., Mónico, L.F. (2011). Suitability analysis of advanced diesel combustion concepts for emissions and noise control. *Energy*; 36(2):825–838. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.032>

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT (no revisado por pares).

- Tsujimura, T., Suzuki, Y. (2017). The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 19, Pages 14019-14029, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.152>
- Vamshikrishna, A.R., Sharathkumar, T., Tharunkumar, D.K., Dinesh, B., Saisantosh, Y.V.S. (2014). Energy and Exergy Analysis of I.C. Engines. *The International Journal of Engineering and Science*, Vol. 3, Issue 5, pp. 7-26. <https://www.theijes.com/papers/v3-i5/version-1/B03501007026.pdf>
- Varde, K., Frame, G. (1983). Hydrogen aspiration in a direct injection type diesel engine-its effects on smoke and other engine performance parameters. *Int J Hydrog Energy*; 8(7):549–555. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(83\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0360-3199(83)90007-1)
- Verhelst, S., Wallner, T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 35, Issue 6, Pages 490-527, ISSN 0360-1285, <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2009.08.001>.
- Verma, G., Prasad, R.K., Agarwal, R.A., Jain, S., Agarwal, A.K. (2016). Experimental investigations of combustion, performance and emission characteristics of a hydrogen enriched natural gas fuelled prototype spark ignition engine, *Fuel*, Volume 178, Pages 209-217, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.022>.
- Wallner, T., Lohse-Busch, H., Gurski, S., Duoba, M., Thiel, W., Martin, D., Korn, T. (2008). Fuel economy and emissions evaluation of a BMW hydrogen 7 mono-fuel demonstration vehicle. *Int J Hydrogen Energy*; 33(24):7607–7618. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.08.067>
- Wang, S., Ji, C., Zhang, B. (2010). Effects of hydrogen addition and cylinder cutoff on combustion and emissions performance of a spark-ignited gasoline engine under a low operating condition. *Energy*; 35(12):4754-4760. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.015>
- Williams, R.B., Kornbluth, K., Erickson, P.A., Jenkins, B.M., Gildart, M.C. (2007). Estimates of hydrogen production potential and costs from California Landfill Gas. *In: proceedings of 15th European Biomass Conference and Exhibition*, Berlin, Germany, May 7-11. <https://ucdavis.app.box.com/s/po8r7vl89hhh4yz4t9xb14wma78k5pwr>
- Yadav, V.S., Soni, S.L., Sharma, D. (2014). Engine performance of optimized hydrogen-fueled direct injection engine. *Energy*; 65:116–122. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.007>
- Yilmaz, A.C., Uludamar, E., Aydin, K. (2010). Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. *Int J Hydrogen Energy*; 35(20):11366-11372. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.040>
- Zamfirescu, C., Dincer, I. (2008). Using ammonia as sustainable fuel. *J Power Sources*; 185(1):459-465. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.02.097>
- Zheng, S., Zhang, X., Wang, T., Liu, J. (2015). An experimental study on premixed laminar and turbulent combustion of synthesized coalbed methane. *Energy*; 92(3):355-364. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.007>

Este preprint fue presentado bajo las siguientes condiciones:

- Los autores declaran que son conscientes de que son los únicos responsables del contenido del preprint y que el depósito en SciELO Preprints no significa ningún compromiso por parte de SciELO, excepto su preservación y difusión.
- Los autores declaran que se obtuvieron los términos necesarios del consentimiento libre e informado de los participantes o pacientes en la investigación y se describen en el manuscrito, cuando corresponde.
- Los autores declaran que la preparación del manuscrito siguió las normas éticas de comunicación científica.
- Los autores declaran que los datos, las aplicaciones y otros contenidos subyacentes al manuscrito están referenciados.
- El manuscrito depositado está en formato PDF.
- Los autores declaran que la investigación que dio origen al manuscrito siguió buenas prácticas éticas y que las aprobaciones necesarias de los comités de ética de investigación, cuando corresponda, se describen en el manuscrito.
- Los autores declaran que una vez que un manuscrito es postado en el servidor SciELO Preprints, sólo puede ser retirado mediante solicitud a la Secretaría Editorial deSciELO Preprints, que publicará un aviso de retracción en su lugar.
- Los autores aceptan que el manuscrito aprobado esté disponible bajo licencia [Creative Commons CC-BY](#).
- El autor que presenta el manuscrito declara que las contribuciones de todos los autores y la declaración de conflicto de intereses se incluyen explícitamente y en secciones específicas del manuscrito.
- Los autores declaran que el manuscrito no fue depositado y/o previamente puesto a disposición en otro servidor de preprints o publicado en una revista.
- Si el manuscrito está siendo evaluado o siendo preparando para su publicación pero aún no ha sido publicado por una revista, los autores declaran que han recibido autorización de la revista para hacer este depósito.
- El autor que envía el manuscrito declara que todos los autores del mismo están de acuerdo con el envío a SciELO Preprints.