

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

# Hidrogeno en su producción, almacenamiento y combustión de motores

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

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

Enviado en: 2024-08-28

Postado en: 2024-12-02 (versión 2)

(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 agrega colaborador

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

# Hidrogeno en su producción, almacenamiento y combustión de motores

*Hydrogen in its production, storage and combustion of engines*

**Héctor Hugo Riojas-González<sup>1\*</sup>**, email: [hriojasg@upv.edu.mx](mailto:hriojasg@upv.edu.mx), Orcid ID:

<https://orcid.org/0000-0003-2401-1110>

**Oswaldo Pérez Medrano<sup>1</sup>**, email: [2439003@upv.edu.mx](mailto:2439003@upv.edu.mx)

**Hiram Herrera-Rivas<sup>1</sup>**, email: [hherrerar@upv.edu.mx](mailto:hherrerar@upv.edu.mx), Orcid ID:

<https://orcid.org/0000-0002-2650-8932>

**Rubén Machucho-Cadena<sup>1</sup>**, email: [rmachuchoc@upv.edu.mx](mailto:rmachuchoc@upv.edu.mx), Orcid ID:

<https://orcid.org/0000-0002-5731-6677>

## Resumen

Existen varias opciones en la producción de hidrogeno, pero el precio para su obtención es alto y algunos problemas técnicos siguen sin resolver, de igual forma, el almacenamiento del hidrogeno, es otro desafío sobre todo en el tema de seguridad. **[Objetivo]** Tiene como finalidad este estudio, el explorar algunas alternativas, que se le pueden hacer al hidrogeno para que este pueda funcionar adecuadamente en los motores de combustión interna. **[Metodología]** La metodología de investigación científica de este estudio, está basado en un proceso sistemático de búsqueda mixto: cualitativo - cuantitativo, organizativo, y con un análisis de la documentación, en base a una revisión bibliográfica exhaustiva. **[Resultados]** Entre los resultados de esta investigación se tiene que, el problema del almacenamiento del hidrogeno puede ser resuelto usando metilciclo hexano, otra alternativa, es que en el vehículo de transporte genere su propio hidrogeno, con esto se puede solucionar la complejidad del almacenamiento y hasta dar una solución, en el costo para la obtención del hidrogeno. **[Conclusión]** Se llegó a la conclusión de este estudio, en que la ubicación de la inyección del hidrogeno llega a jugar un papel fundamental, finalmente cabe destacar la gran sinergia de mezcla que puede llegar a generar, tanto el hidrogeno con el metano, en la producción, almacenamiento, distribución, y hasta para la combustión en motores de combustión interna.

**Palabras clave:** Hidrogeno, almacenamiento, motores, producción, metano, mezcla

## Abstract

There are several options in the production of hydrogen, but the price for obtaining it is high and some technical problems remain unresolved, likewise, storage of hydrogen is another challenge especially on the issue of safety. **[Objective]** The purpose of this study is to explore some alternatives that can be made for hydrogen so that it can function properly in internal combustion engines. **[Methodology]** The scientific research methodology of this study is based on a systematic process of mixed search: qualitative - quantitative, organizational, and with an analysis of the documentation, based on an exhaustive bibliographical review. **[Results]** Among the results of this research, the hydrogen storage problem can be solved by using methylcyclohexane, or alternatively, the transport vehicle generates its own hydrogen. This can solve the complexity of storage and even give a solution, in the cost for obtaining hydrogen. **[Conclusion]** The study concluded that the location of the

---

\* Autor para correspondencia:

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

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Victoria, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

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

hydrogen injection plays a fundamental role, finally we should highlight the great synergy of mixture that can be generated, both the hydrogen with methane, in production, storage, distribution and even for combustion in internal combustion engines.

**Keywords:** Hydrogen, storage, engines, production, methane, mixture

## Resumo

Existem várias opções na produção de hidrogênio, mas o preço para obtê-lo é alto e alguns problemas técnicos ainda não resolvidos, da mesma forma, o armazenamento do hidrogênio, é outro desafio principalmente na questão da segurança. **[Objetivo]** O objetivo deste estudo é explorar algumas alternativas que podem ser feitas para o hidrogênio, de modo que ele possa funcionar adequadamente em motores de combustão interna. **[Metodologia]** A metodologia de pesquisa científica deste estudo, é baseada em um processo sistemático de busca mista: qualitativa - quantitativa, organizacional e com uma análise da documentação, com base em uma revisão bibliográfica exaustiva. **[Resultados]** Entre os resultados desta pesquisa tem que, o problema do armazenamento de hidrogênio pode ser resolvido usando metilciclo hexano, outra alternativa é que no veículo de transporte gera seu próprio hidrogênio, com isso pode-se resolver a complexidade do armazenamento e até dar uma solução, no custo para a obtenção do hidrogênio. **[Conclusão]** Chegou-se à conclusão deste estudo, em que o local de injeção do hidrogênio chega a desempenhar um papel fundamental, finalmente, é importante destacar a grande sinergia de mistura que pode vir a gerar, tanto o hidrogênio com metano, na produção, armazenamento, distribuição, e até mesmo para a combustão em motores de combustão interna.

**Palavras-chave:** Hidrogênio, armazenamento, motores, produção, metano, mistura

## Introducción

Se espera que la población mundial en el consumo de petróleo supere los 9 mil millones 2050 y esto ocasione un aumento de un 60% para el transporte, mientras que el consumo de vehículos personales se espera que, aumenten en alrededor de 1.7 mil millones en 2040 (Hegab et al., 2017). El hidrogeno es uno de los gases más abundantes en el universo, presente en el sol y las estrellas, la improbabilidad de su agotamiento resulta incuestionable, en comparación con el combustible fósil (Rubio et al., 2015). Pero el hidrogeno, no está disponible en su forma molecular (como elemento libre), y debe ser producido utilizando otras fuentes de energía, por lo general produciéndose de fuentes no renovables, como el petróleo, gas natural y el carbón (Balat et al., 2010). Por lo tanto, el hidrogeno se considera un portador de energía, en lugar de una fuente de energía (Verhelst et al., 2009). El objetivo de este estudio es presentar diferentes soluciones al almacenamiento, producción y combustión del hidrogeno en motores de combustión interna.

## Metodología

La metodología de investigación científica de este estudio, está basado en un proceso sistemático de búsqueda, organización y análisis de la documentación de las aplicaciones y el funcionamiento del hidrogeno en los motores. En un proceso sistemático de búsqueda mixto: cualitativo - cuantitativo, organizativo, y con un análisis de la documentación. Se enmarca como un tipo de investigación analítica, utilizando estrategia y herramientas de análisis documental. Los criterios de este estudio que especifican las características

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

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 aplicación de la energía renovable, contribuye solo el 5% de la producción comercial del hidrogeno, el cual se realiza principalmente a través de la electrolisis del agua, mientras que el otro 95% de hidrogeno es principalmente derivado de combustibles fósiles (Ni et al., 2004). Si bien la producción de hidrogeno por electrolisis, en carga solar o en plantas eólicas está ganando atención, su probabilidad no se ve a mediano plazo (Klell et al., 2012). El hidrogeno como combustible, es adecuado para uso en sistemas de generación de energía de alta eficiencia, pero es relativamente difícil para aplicaciones prácticas, y puede llegar a dar problemas tanto de seguridad, como de almacenamiento (Huang et al., 2017). Existen varias opciones en la producción de hidrogeno, se puede obtener del gas natural, en plantas de energía atómica basadas en síntesis (Merkisz et al., 2004), gasificación, electrolisis, separación de agua termoquímica, con altas temperaturas, reformador liquido renovable, producción de hidrogeno microbiano, y por procesos biológicos (Dimitriou et al., 2017). Entre otras opciones para producir  $H_2$ , está la solución híbrida, conocida como “Power to gas” ( $P_2G$ ), tecnología pionera de Japón, que produce hidrogeno a partir de la electrolisis del agua de mar (Hashimoto et al., 1999). Posteriormente algunos países europeos liderados por Alemania, también han participado en el desarrollo de la tecnología  $P_2G$ , con 17 proyectos pilotos (ENEA 2016), así como de la primera planta industrial de  $P_2G$  (E-gas) elaborada por Audi (Rieke, 2015). La técnica Power to gas (PtG) consiste en, convertir electricidad renovable en  $H_2$  usando electrolisis, almacenándolo en la red de gas natural (Scamman et al., 2016). La técnica del plasma no térmico (Figura 1), es otra alternativa para generar hidrogeno, con ayuda de hidrocarburos, alcoholes o agua, este sistema de reacción de flujo, puede requerir tiempos de resistencia cortos (Kabashima et al., 2001).

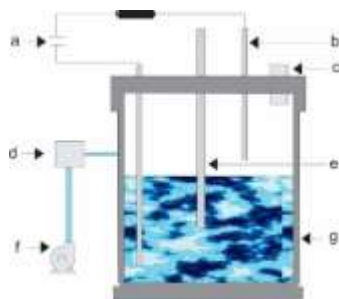


Figura 1. *Esquema del dispositivo utilizado para la exposición ante el plasma no térmico; a) fuente de alto voltaje, b) electrodo de tungsteno, c) válvula para muestras, d) medidor de vacío, e) termómetro, f) bomba de vacío, g) cámara de reacción.* (Elaboración propia).

Una técnica común para convertir un gas, en un combustible líquido, es la síntesis de Fischer-Tropsch (F-T), esta técnica combina hidrogeno, con el monóxido de carbono, para formar diferentes hidrocarburos líquidos, los cuales pueden ser procesados posteriormente

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

en refinerías, y así generarse combustibles líquidos (Bassiony et al., 2016), este combustible se llama GTL de la técnica Fischer-Tropsch, en donde su producción, ha ido creciendo en países de grandes reservas de gas natural como Qatar (Bassiony et al., 2016). En términos generales, el precio para la producción del hidrogeno, sigue siendo relativamente alto, y algunos problemas técnicos siguen sin resolver (Mehra et al., 2017), este artículo pretende dar una revisión sobre las tendencias y opciones para poder aplicar el H<sub>2</sub> en el sector de transporte. Por lo que el objetivo de este estudio es presentar diferentes soluciones al almacenamiento, producción y combustión del hidrogeno en motores de combustión interna.

### **Almacén de H<sub>2</sub>**

Se necesita de un avance tecnológico en el almacenamiento de H<sub>2</sub>, la gasolina líquida y el diésel seguirán siendo dominantes hasta que no se mejoren las tecnologías de almacenamiento (Korakianitis et al., 2011), de igual forma se encuentra el transporte del H<sub>2</sub>, el cual necesita de estándares relacionados con aspectos de seguridad, como su distancia, tasas de reabastecimiento y detección de fugas (Roshia et al., 2018). Según en el estudio de Najjar (2013), explico que los riesgos generados en el manejo y almacenamiento del H<sub>2</sub>. Determinaron que se requiere de una instalación adecuada de H<sub>2</sub>, con un recipiente de alta presión, para evitar el efecto fisiológico (congelación y asfixia) efecto físico (fragilidad y fallas de componentes) y químico (quemadura o explosiones). La capacidad del H<sub>2</sub> para penetrar a través del acero puede llegar a causar un efecto de fragilidad y provocar fallas en los componentes. El hidrogeno podría almacenarse en un automóvil empleando un recipiente metálico como líquido criogénico o como gas comprimido (Jamal et al., 1994). Sin embargo, la presión típica de almacenamiento en gas comprimido va desde 138 bar (2000 psi) hasta 414 bar (6000 psi) y también el hidrogeno se puede almacenar con temperaturas de -253°C en un sistema de almacenamiento pasivo y aislado (Verhelst et al., 2009). Si llega a tener contacto con el calor, el hidrogeno líquido se evaporará, lo que generará un aumento de presión (Verhelst et al., 2009), esto hace que el almacenamiento del H<sub>2</sub> tenga varios retos, entre los cuales se encuentra, el aumento de peso, volumen, infraestructura del H<sub>2</sub> y seguridad (Christodoulou et al., 2014). El almacenamiento en tanques presurizados, es una alternativa para el hidrogeno cuando este, es producido por la técnica de Power-to-gas (PtG) (Bailera et al., 2017). El almacenamiento puede ser potencialmente resuelto con el uso del metilciclo hexano (MCH), el cual es un líquido de 126°C a 100°C en donde puede almacenar aproximadamente 500 litros de H<sub>2</sub> en 1 litro de MCH líquido, en donde el MCH tiene la capacidad de almacenar una gran cantidad de H<sub>2</sub> de manera estable y compacta (Tsuji-mura et al., 2017), según lo propuesto por Okada et al., (2013), y estudiado por Kojima et al., (2017), la reacción del H<sub>2</sub> con tolueno y MCH hacen que su almacenamiento y suministro sea relativamente fácil.

### **H<sub>2</sub> a bordo**

Actualmente el costo para obtener el H<sub>2</sub> es muy elevado (Najjar, 2013) y si le agregamos que existe una falta de infraestructura para su abastecimiento, por todo lo anterior, se justifica el uso de un generador de H<sub>2</sub> a bordo del vehículo, siendo esto último posible y factible económicamente (Christodoulou et al., 2013). La utilización del amoníaco (por su alto contenido de hidrogeno por unidad de peso y volumen), podría considerarse como una solución transitoria, para una sociedad consumidora de hidrogeno, de hecho 108 kg de H<sub>2</sub>

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

están presentes en un  $\text{m}^3$  de amoníaco líquido (Zamfirescu et al., 2008). Por lo que el amoníaco, puede utilizarse como un portador de energía líquida, el cual puede convertirse fácilmente en hidrógeno y nitrógeno (Schüth et al., 2012). El método para obtener hidrógeno directamente, es por el craqueo de amoníaco, el cual se puede apoyar de un catalizador sólido (Schüth et al., 2012) (Figura 2) De esta forma en aplicaciones vehiculares, el hidrógeno podría ser sintetizado a bordo del vehículo inyectando el  $\text{H}_2$ , junto con el amoníaco, en la cámara de combustión del motor. Esto quiere decir, que no se requiere de un tanque de hidrógeno aparte (Comotti et al., 2015). Otra alternativa es instalar a bordo del vehículo, un reformador catalítico de combustible (CFR), el cual es eficaz para la obtención de hidrógeno, por medio de una catálisis, con unas condiciones de temperatura óptimas. Incluso los hidrocarburos podrían ser reformados en gas combustible enriquecido de  $\text{H}_2$ , mediante un reformado a vapor, reformado auto-térmico o en oxidación parcial (Tartakovsky et al., 2013). Siendo el reformador de vapor, el más ventajoso para el rendimiento del motor, ya que no solo produce la mayor cantidad de  $\text{H}_2$ , sino también ayuda en la recuperación de energía en el escape del motor (Cracknell et al., 2004). Cuando se combina un reformador con un motor de combustión interna (Choi et al., 2005), usando gasolina como combustible principal, la mezcla de hidrógeno producido por el reformador en combustión híbrida, ayuda a impulsar al motor. El uso de esta combinación, no solo aumenta la eficiencia térmica del motor, sino que también puede reducir el consumo de combustible, y la reducción de las emisiones de gases de escape como HC, CO y  $\text{NO}_x$  (Bromberg et al., 2004). De acuerdo con Huang et al., (2015), obtuvieron con éxito un sistema de reformador de bujías, con un atomizador supersónico, para la producción de hidrógeno. Se concluye que el sistema de reformador de plasma, puede reducir el consumo de combustible, y puede tener una baja temperatura de funcionamiento (Huang et al., 2017).

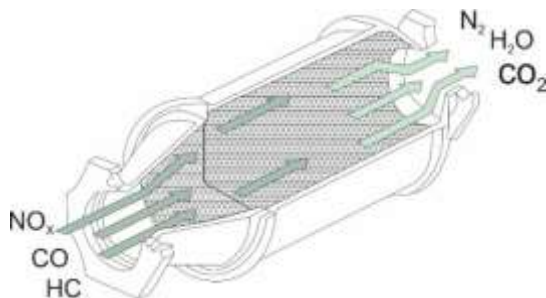


Figura 2. *Catalizador 3 vías, estructura interna del catalizador de 3 vías.* (Elaboración propia)

### **Características de $\text{H}_2$ en la combustión**

El  $\text{H}_2$  tiene el mayor contenido de energía, entre todos los combustibles (Chintala et al., 2017), incluso 1Kg de  $\text{H}_2$  produce casi 3 veces más energía que el diésel y gasolina (Dimitriou et al., 2017). El hidrógeno tiene muchas ventajas, entre las cuales, tiene una alta velocidad de llama, corta distancia de enfriamiento, alto valor calorífico y alta difusividad, que podría llevar a una alta eficiencia de combustión (Babu et al., 2013). Sin embargo, la baja densidad del  $\text{H}_2$ , plantea importantes problemas con respecto al almacenamiento requerido, para impulsar un vehículo (Dimitriou et al., 2017). La generación de emisiones en una combustión de hidrógeno, puede provocar tasas de hidrocarburos. Que pueden ser por el aceite lubricante emitido y sobre todo, cuando el hidrógeno se mezcla con el aire en altas

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

temperaturas, produciendo NOx. Estas emisiones de NOx, pueden ser evitadas en gran medida, con una combustión magra, que a la vez ayudara a una mayor eficiencia del motor, el funcionamiento del motor magro se refuerza, con alta velocidad de la llama del hidrogeno (Park et al., 2012). Durante la combustión, se debe tomar en cuenta, la distancia de propagación de la llama, la duración de la combustión, y la tasa de aumento de la presión. Todo esto afecta la potencia, la economía y la estabilidad de la combustión en el motor (Zheng et al., 2015). En la utilización del hidrogeno, durante la combustión en los motores, pueden causar pre-ignición y contrafuego (Ma et al., 2008). El uso del hidrogeno puede limitar el rango de carga, esto puede ser debido, a la baja densidad del hidrogeno, que a su vez puede reducir la eficiencia volumétrica del motor (Verma et al., 2016). La no regularidad de la mezcla aire-gas-H<sub>2</sub>, conduce en una perturbación en las características de flujo en el cilindro, el cual produce una variación en la carrera de combustión del motor. Esta variación se debe a los cambios en la velocidad de combustión relacionado por el H<sub>2</sub> (Jemni et al., 2018). Por lo que la ubicación de la inyección de H<sub>2</sub> juega un papel importante para evitar explosiones no deseadas. La inyección directa es un método más adecuado que la inyección en puerto, esto para poder evitar el efecto de fuego trasero (Fayaz et al., 2012). Esto resulta de suma importancia para evitar cualquier comportamiento de combustión no deseado por razones de seguridad (Hairuddin et al., 2014). Se puede evitar esas anomalías de combustión con una operación magra (Verhelst et al., 2009), de acuerdo con el estudio de Wallner et al., (2008), realizaron un experimento en un vehículo BMW hydrogen 7 equipado con una configuración de catalizador, que consta de 2 partes, la primera fue de un régimen de operación estequiométrico y en la segunda fue en operación magra, la reducción de los picos de NOx se dio cuando se cambió del magro al estequiométrico. El hidrogeno por lo general puede acelerar la combustión, reduce las pérdidas de escape y aumenta la potencia de salida del motor, obteniendo una mejora en el rendimiento del motor a baja velocidad. En carga parcial supera en velocidad a la carga alta, lo que indica que el H<sub>2</sub> durante el proceso de admisión, es más adecuado para motores que están sujetos a una carga parcial (Wang et al., 2010), la adición de H<sub>2</sub> reduce también el consumo específico de combustible de la mezcla (Baghdadi, 2003).

### **Gas HHO**

El gas hidroxilo HHO también conocido como gas oxihidrogeno, es un combustible renovable, reciclable y no contaminante, con alta velocidad de llama laminar y amplio rango de inflamabilidad (Rahman et al., 2013). El gas HHO es la combinación de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en una proporción de 2:1 por volumen producido a partir de la electrolisis del agua (Masjuki et al., 2016). El gas hidroxilo (HHO) es la fuente de energía más limpia entre todos los combustibles alternativos. El gas hidroxilo (HHO) se forma al separar los átomos de la molécula del agua por electrolisis (teóricamente 67% H y 33% O) el valor calorífico de 1 Kg de HHO es 3 veces y 3.2 veces mayor que la gasolina y diésel respectivamente (Yilmaz et al., 2010). Todo el escape de las emisiones excepto en nitrógeno se puede regular usando H<sub>2</sub> como combustible (Aydin et al., 2018). El gas HHO o conocido como gas de Brown se deriva de la electrolisis del agua como resultado de la división de los átomos de hidrogeno y oxigeno (del agua), que constituyen una mezcla homogénea que es el gas de Brown (Chrapplewska et al., 2011). Es posible alimentar los motores CI con gas HHO, sin embargo, considerando que su producción es limitada, así como una gran cantidad de energía necesaria para dividir el agua, parece razonable usar el gas HHO para alimentar el combustible gaseoso. La tecnología de

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

generación de gas HHO se llama producción en demanda, que significa que el gas se genera en una cantidad tal que se necesita agregar el principal combustible que necesita el motor y el hidrogeno no se almacena (Chraplewska et al., 2011). La producción de gas, comienza cuando el motor se enciende y acaba cuando se apaga. En un beneficio de esta tecnología que el gas no se almacene en ningún lugar, lo que minimiza la amenaza de explosión, sería demasiado peligroso almacenar el gas, ya que transporta alta energía, quemándose fácilmente y produciendo violentamente mucha energía. Este método de producción, todo el gas que se deriva se envía al colector de admisión del motor, mezclando allí con aire y el gas HHO puro el cual está presente solamente en la manguera que conecta el colector y el generador (Chraplewska et al., 2011). Existen algunas investigaciones sobre los efectos de la adición de gas HHO en el rendimiento de motor SI (Yilmaz et al., 2010), los estudios indican que el gas HHO puede llegar a influir, de la misma forma que lo hace el H<sub>2</sub> para el rendimiento del motor (Al-Rousan, 2010). Al enriquecer el aire de admisión con HHO, se puede ampliar el rendimiento del motor, comparándolo con el H<sub>2</sub> y con el diésel puro (Thangaraj et al., 2018). La utilización de gas HHO garantiza la protección del medioambiente por la reducción de las emisiones, el gas HHO se induce a través del colector de admisión en medio de la carrera de succión (Ozcanli et al., 2017). El gas HHO ofrece las mejores características de rendimiento con una reducción de emisiones, debido a sus especificaciones de combustión, tales como oxígeno adicional, alta temperatura de combustión y libre contenido de carbono (Aydin et al., 2018). Los valores de rendimiento y emisiones de escape mejoran con HHO y H<sub>2</sub>, con excepción de NO<sub>x</sub>, al considerar el costo y la seguridad de aplicación, el enriquecimiento con HHO es más preferible en los motores diésel (Aydin et al., 2018). Samuel y McCormick (2010), instalaron un generador de oxihidrogeno en un motor diésel de un solo cilindro, para introducir pequeñas cantidades de H<sub>2</sub> y el oxígeno. El análisis experimental reveló que enriqueciendo el aire con H<sub>2</sub> y el oxígeno, puede proporcionar hasta un 5.4% de ahorro de combustible y una reducción de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, el aumento de oxihidrogeno aumento los niveles de humo, los autores señalaron que el aumento de H<sub>2</sub>, reduce la duración de la combustión y aumenta la tasa de presión, sin alterar la ubicación de combustión. Por lo tanto, el tiempo puede ser retardado, para reducir el trabajo durante la combustión y aumentar la economía del combustible. Masjuki et al., (2016), informaron que agregaron el gas hidroxilo (una mezcla de hidrogeno y oxigeno) con 20% de biodiesel de palma, la mezcla reduce el consumo de combustible en un 5%, también disminuyo la emisión de CO en 20% y la emisión de HC en un 10%, pero aumento la emisión de NO<sub>x</sub> en un 25% en comparación con el biodiesel ordinario. El agregar gas HHO con mezclas de biodiesel junto con EGR en el motor, mejoran las características generales del motor (Thangaraj et al., 2018).

### **Sinergia de hidrogeno con metano**

El reformador de metano a vapor (SMR) es el proceso más común y menos costoso, para producir hidrogeno del gas natural (Figura 3). Los costos de producción de hidrogeno, a partir de gas natural son aproximadamente 1.50 US\$/kg, en instalaciones a gran escala (1.2 Gg/d) y de aproximadamente 3.75 US\$/kg, en una instalación de 500 kg/d (suponiendo un precio de gas natural de 7 US\$/Gj) (Williams et al., 2007). Al mezclar el hidrogeno con el metano, ha demostrado una gran variedad de ventajas y sinergias, tanto para la producción, como para el almacenamiento, distribución y combustión en motores de combustión interna (Klell et al., 2012).

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

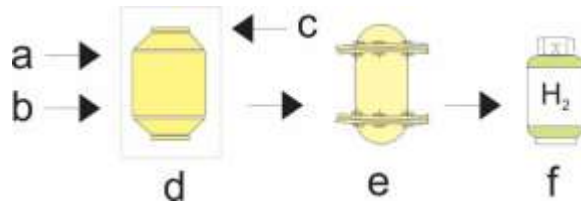


Figura 3. *Reformado con metano; proceso del reformador; a) gas natural, b) combustible, c) vapor, d) reformador, e) enfriamiento, f) hidrogeno.* (Elaboración propia)

La mezcla de hidrogeno y metano puede ser almacenado en compuesto químico, físico, criogénico, liquido o como gas comprimido (Hirscher, 2010). Desde un punto de vista práctico, el almacenamiento de gas comprimido, es lo más razonable y aconsejable (Klell et al., 2012). El gas natural se suele comprimir a 200 bar, el hidrogeno a 350 bar y hasta con 700 bar. Los recipientes a presión comerciales están hechos de acero, y ofrecen buenas propiedades de seguridad y resistencia, pero con un mayor peso. Para reducir el peso, se han construido contenedores compuestos con un forro interior fino, que puede ser metal (acero o aluminio) o también puede ser de fibra de carbono. Estos últimos son más ligeros, pero también más caros, sobre todo por la creciente demanda de la fibra de carbono (Klell et al., 2012). Finalmente se puede distribuir y producir el hidrogeno, con la infraestructura existente del gas natural (almacenamiento, transporte y distribución) (Chintala et al., 2017).

### El fenómeno del golpe al mezclar $H_2$ en combustión dual

Uno de los requisitos de cualquier combustible gaseoso, en combustión dual, en la mezcla aire-combustible, es el evitar la auto-inflamación espontanea (Karim et al., 2003). En hacerlo, puede llevar al inicio del golpe (Figura 4), esto ocasiona una alta tasa del aumento de presión, alta presión pico y un sobrecalentamiento en las paredes del cilindro (Chintala et al., 2017). El fenómeno del golpe, se puede definir como algo anormal, que ocurre en la combustión, y limita el desempeño del motor (Chintala et al., 2017). Esta quema anormal o detonación del combustible, libera grandes cantidades de calor dentro del motor. Lo que hace que aumente excesivamente la temperatura, y la presión dentro del motor, reduciendo drásticamente su eficiencia térmica (Vamshikrishna et al., 2014). El golpe se puede detectar físicamente, cuando el motor vibra excesivamente, y también cuando se escucha un ruido en la combustión, lo cual puede ser causando, por una pérdida de potencia, y si no se llegará a controlar a tiempo, la detonación puede provocar daños graves en el motor y con esto acortar su vida útil (Hairuddin et al., 2014).

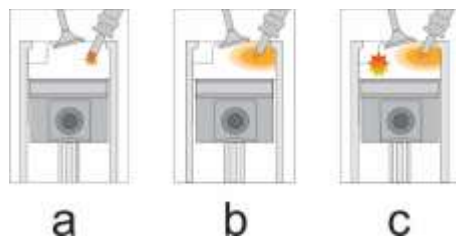


Figura 4. *Detonación golpe, fenómeno de detonación; a) inicio de la chispa, b) combustión, c) detonación.* (Elaboración propia)

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

Existen varias maneras para monitorear y detectar el golpe, entre los que se encuentra, la medición de detección basada, en la tasa de aumento de presión del cilindro, la vibración del bloque (del cilindro), el análisis de medición de ondas acústicas, y en los análisis de la transferencia de calor (Abdelaal et al., 2013). Desafortunadamente el hidrogeno como combustible, tiene algunos inconvenientes en los motores, entre los cuales está, su baja densidad y menor energía volumétrica, comparativamente al metano (Baratta et al., 2017). También está la posibilidad del pre-encendido, y las reacciones químicas generadas por metales (PiĀtak et al., 2011), la formación de NOx y el fenómeno del golpe (Lee et al., 2011). Por lo que el uso del hidrogeno como único combustible o como aditivo (HCNG), es limitado por lo antes señalado (Szwaja et al., 2013). Esta trae como consecuencia que los golpes y fallas, deben evitarse en el funcionamiento del motor, ya que ambos pueden contribuir al deterioro del rendimiento del motor (Hairuddin et al., 2014). Ahora bien, el fenómeno del golpe, no solo lo provoca la presencia del hidrogeno, existen otros factores que van relacionados, como puede ser la relación de compresión, esto lo menciona el estudio de Liew et al., (2012) en donde, la eficiencia térmica mejora, con el aumento de H<sub>2</sub>, pero la eficiencia disminuye con la reducción de las relaciones de compresión (Karim, 2003a). Mencionan que el problema del golpe en una combustión dual, se intensifica rápidamente con el aumento de la relación de compresión del motor (Karim, 2003a). Independientemente de la presencia del H<sub>2</sub>, existen opciones para evitar el golpe en el motor al aplicar el hidrogeno. Una de las opciones más empleadas, es regular la cantidad máxima de energía de H<sub>2</sub> en combustión dual, de esta manera, se restringe el posible golpe (Köse et al., 2013). En la Tabla 1 se presentan porcentajes óptimos de hidrogeno, de acuerdo a las condiciones de operación del motor.

Tabla 1. *Óptimo porcentaje de hidrogeno de acuerdo a las condiciones del motor CI*

<b>Porcentaje óptimo de H<sub>2</sub></b>	<b>Condición de operación</b>	<b>Esto es debido a</b>	<b>Referencia</b>
5%	Uniformidad de mezcla de H <sub>2</sub> con aire	Con la mezcla se aumentó el BTE por el H <sub>2</sub>	Szwaja et al., 2009
11%	Motor de inyección directa con RC de 17:4:1	Se analizó que los niveles de ruido acústico aumentan, cuando tiene más del 11% en H <sub>2</sub>	Varde et al., 1983
6 al 25%	En cargas altas	El máximo consumo de energía, está en el rango de 6 a 25% de H <sub>2</sub> , sin embargo, en cargas bajas puede aumentar en 30%	Chintala et al., 2014
26%	4.4 Kw de potencia nominal a 1500 rpm	La mejora de la eficiencia con H <sub>2</sub> en combustible dual, fue con carga del 75% (BMEP de 4 bares)	Yadav et al., 2014
30%	En condiciones de plena carga	Para evitar el golpe en la combustión hidrogeno-diésel, no debe subir del 30% de H <sub>2</sub>	Saravanan et al., 2008
5 al 10%	Mejora la combustión con un aumento en la pérdida de enfriamiento	Con este pequeño rango de H <sub>2</sub> , se logra la máxima eficiencia térmica	Park et al., 2011

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

El posible golpe por la presencia de H<sub>2</sub>, se genera cuando se supera el 16% en la relación de energía, esto lo confirmo Guo et al., (2011), quienes informaron que es necesario usar H<sub>2</sub> con una fracción de masa inferior al 15%, para lograr una combustión estable. De acuerdo a la revisión de literatura, varía el porcentaje de energía máxima de H<sub>2</sub> en combustión dual, por lo general está limitada del 6% al 25% (Chintala et al., 2017). Otros autores como Lata et al., (2011), que señalan que la cantidad máxima de hidrogeno es hasta el 50%, debido a los problemas del golpe. En la Tabla 2, se analizan las condiciones del golpe, al agregar hidrogeno en el combustible. Existen otras opciones para reducir el golpe, además de regular la cantidad de hidrogeno en el motor.

Tabla 2. *El fenómeno del golpe en la combustión por agregar hidrogeno como combustible*

<b>Tendencia a la detonación</b>	<b>Condiciones de operación</b>	<b>Referencia</b>
Con un 19% de H <sub>2</sub> es la cantidad máxima que podría agregarse en el motor para no recibir golpes	En un motor dual de 7.4 Kw de potencia nominal a 1500 rpm, y con una relación de compresión de 19:5:1	Chintala et al., 2015
El golpe en la combustión es directamente proporcional a su tasa máxima de aumento de la presión	En un motor CI si tiene detonaciones, el motor recibe daño severo en la ruptura de los anillos del pistón, la fusión del pistón y erosión de la culata	Torregrosa et al., 2011
Con puro H <sub>2</sub> el rango de operación es muy limitado debido a la alta resistencia del H <sub>2</sub> a la auto-ignición	Se aplicó en un motor CI solamente H <sub>2</sub> , pero pronto se dio cuenta el problema del rango de operación, no se pudo resolver, incluso a una relación de compresión de 29:1	Homan et al., 1979
El motor solo con H <sub>2</sub> genero una fuga de combustible, generando el golpe de disparo a la ignición del H <sub>2</sub>	Convirtió un mono-cilíndrico refrigerado por agua de inyección directa de 4 tiempos de aspiración natural, y cuando solo le agrego H <sub>2</sub> , se dio cuenta que la cámara de turbulencia del motor, está viciada generando golpes en el motor	Ikegami et al., 1982
El golpe de combustión se da con una mayor velocidad del motor (más de 3000 rpm)	Se realizó un estudio para determinar la frecuencia del golpe agregando H <sub>2</sub> , por lo que el H <sub>2</sub> genera muchos cambios dentro de la mezcla	Luo et al., 2016

Está el caso del uso de diluyentes, tales como el helio y nitrógeno, los cuales se pueden mezclar con el hidrogeno, esto último fue estudiado por Mathur et al., (1993), en esa investigación, se eligieron el helio, para controlar el golpe de motor, la eficiencia térmica y el porcentaje de sustitución óptima de la energía de H<sub>2</sub>. El resultado fue, que el nitrógeno exhibió, la mejor influencia en el rendimiento del motor, y potencia de salida. De acuerdo con Gómez et al., (2018), explican que, al aumentar la velocidad del motor, puede lograr una

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

mayor intensidad de turbulencia, en la mezcla dentro del cilindro. Reduciendo con esto, la duración de la combustión y disminuyendo la posibilidad de ocurrencia de golpes. La adición de la inyección de agua, en un motor de combustible dual basado en hidrogeno, reduce la tendencia a golpes en el motor, esto lo señalaron Prabhukumar et al., (1987), en donde indican que la inyección de agua a través de su colector de admisión, en un motor de combustible dual, con hidrogeno, genera un aumento de la potencia de salida y limita el golpe, esto último porque disminuye la temperatura de la mezcla sin quemar. Los autores Mathur et al., (1993), informaron que lograron hasta un 66% de energía de hidrogeno, junto con la inyección de agua, logrando con esto un funcionamiento suave del motor, sin golpes y además con una reducción drástica de humo y NOx.

## **Conclusiones**

La utilización del amoniaco podría ser la solución transitoria (debido al alto contenido de hidrogeno) para el uso del hidrogeno, el cual puede convertirse fácilmente en hidrogeno y nitrógeno, pero también podría obtenerse el hidrogeno por medio del gas natural. Otra opción distinta, es optar por un reformador catalítico de combustible, reformador de vapor o por un reformador de metano a vapor, y aplicarse en una combustión hibrida, usando la gasolina como combustible principal. Se concluye que el método más adecuado para mejorar la combustión, es con la inyección del hidrogeno, el cual puede influir de manera determinante, en la combustión y que la mezcla del hidrogeno con el metano, representando una gran alternativa, para solucionar los desafíos, en la implementación del hidrogeno, como fuente de energía, sobre todo cuando se trata de motores de combustión interna.

## **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>

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

- 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>.
- 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 CO<sub>2</sub>, *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

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

- 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>
- 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>.
- ENEA consulting. (2016). “The Potential of Power-to-gas”, Technology Review and Economic Potential Assessment, <http://www.eneaconsulting.com/wp-content/uploads/2016/01/ENEA-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 CO<sub>2</sub> 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

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

- 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)
- 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>

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

- 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>
- Liew, C., Li, H., Liu, S., Besch, M.C., Ralston, B., Clark, N., Huang, Y. (2012). Exhaust emissions of a H<sub>2</sub>- 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 H<sub>2</sub> 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.

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

- PiČtak, 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>
- 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). CO<sub>2</sub> reutilization in Industrial Projects e State of Art and Realization of Concrete Projects for the Production of Renewable Methane and Solid Products Based on CO<sub>2</sub>, *EMRS spring meeting*, [http://www.ceops-project.eu/sites/default/files/documents/ceops\\_ws\\_5.\\_rieke.pdf](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>.

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

- 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>
- 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.