



Education in Hydrogen Technologies Area

HIDRÓGENO PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



Co-funded by
the European Union

Project is supported
within the Erasmus+ programme
2021-1-CZ01-KA220-VET-000028073

CONTENIDO

Introducción.....	3
1. Historia.....	3
2. EL GAS HIDRÓGENO.....	7
3. el repostaje.....	11
3.1 Repostar en casa.....	13
3.2 Gasolina y diesel.....	13
4 EL PRINCIPIO DE CUATRO TIEMPOS EN UN MOTOR OTTO Y DIESEL.....	15
4.1 El motor Otto.....	16
4.1.1 Fase 1. fase de admisión.....	16
4.1.2 Fase 2. fase de compresion.....	17
4.1.3 Fase 3. fase de combustion o explosión.....	17
4.1.4 Fase 4. fase de escape.....	17
4.2 Las cuatro fases del motor de Diesel.....	17
4.3 El motor Diesel.....	18
4.3.1 Fase 1. fase de admisión.....	18
4.3.2 Fase 2. fase de compresion.....	18
4.3.3 Fase 3. fase de combustion o explosión.....	18
4.3.4 Fase 4. fase de escape.....	19
5 CÓMO FUNCIONA EL HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA?.....	19
5.1 CONVERSIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA PARA QUE FUNCIONE CON HIDRÓGENO.....	20
5.1.1 Fase 1.....	20
5.1.2 Fase 2.....	21
5.1.3 Fase 3.....	22
5.2 DOS FORMAS DE Suministrar EL MOTOR CON HIDRÓGENO.....	22
5.2.1 Fase 4.....	23
6 La fase de investigación.....	25
6.1.1 PUERTO DE INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO.....	25
6.1.2 ENCENDIDO POR COMPRESIÓN DE CARGA HOMOGÉNEA, HCCI.....	25
6.1.3 INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE EN EL PUERTO DE ENCENDIDO POR CHISPA.....	27
6.1.4 ENCENDIDO PILOTO DE COMBUSTIBLE CON INYECCIÓN DE HIDRÓGENO EN PUERTO27	
6.1.5 COMBUSTIÓN DE HIDRÓGENO CON INYECCIÓN DIRECTA.....	28

6.1.6	ENCENDIDO POR BUJÍA INCANDESCENTE.....	28
6.1.7	ENCENDIDO POR CHISPAS CON BUJÍA	29
6.1.8	MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN DE INYECCIÓN DIRECTA DE ALTA PRESIÓN DE COMBUSTIBLE DUAL Fuel	29
6.2	PROS Y CONTRAS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS.....	31
6.3	TRES TIPOS DE INYECCIÓN DIFERENTES.....	32
6.3.1	ACTIVACIÓN ELECTRO-HIDRÁULICA (NTSEL)	32
6.3.2	ACTIVADO POR SOLENOIDE (WESTPORT).....	32
6.3.3	ACCIONADO PIEZOELÉCTRICO (Westport).....	32
7	Conclusiones	33
7.1	LAS VENTAJAS DE CONVERTIR MOTORES EXISTENTES	34
7.2	POR QUÉ usar HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	34
8	Referencias.....	35
9	Refencias de imágenes.....	38
10	Abreviaciones.....	40

Cofinanciado por la Unión Europea. Las opiniones y puntos de vista expresados sólo comprometen a su(s) autor(es) y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea ni los de la Agencia Europea de la Educación y Cultura (EACEA). Ni la Unión Europea ni la EACEA pueden ser considerados responsables de ellos."

INTRODUCCIÓN

La destrucción ambiental directamente relacionada con el uso de combustibles fósiles conocidos, genera un debate energético que nos obliga a encontrar nuevas fuentes de energía. Todos los combustibles fósiles, como todo el petróleo y el gas natural que provienen de la tierra, contienen carbono y este se convierte en dióxido de carbono cuando se quema. Todo lo que contiene carbono y se quema de diferentes maneras, no nos lleva a reducir las emisiones de dióxido de carbono, sino a aumentarlas en la mayoría de los casos.

Con una población en aumento a nivel mundial, crece la necesidad de medios de transporte para particulares, vehículos comerciales, barcos y aviones. Esto aumenta la necesidad de combustible para esta creciente flota. En otras palabras, con una población mundial más grande también hay una necesidad creciente de combustible. Recientemente, se ha vuelto cada vez más evidente que nuestra forma de vida afecta el clima. En algunas partes del mundo, el cambio climático provoca sequías y grandes incendios forestales, mientras que otras partes se ven afectadas por grandes tormentas que provocan inundaciones. Se están realizando investigaciones en varios lugares del mundo y las nuevas tecnologías para todos estos medios de transporte ocupan un lugar destacado en la agenda. Se han investigado combustibles alternativos y algunos ya están en uso, otros todavía están más o menos en etapas de proyecto. La electrificación de diferentes tipos de vehículos es algo que estamos viendo cada vez más, estos vehículos todavía son relativamente caros y es posible que aún no sean accesibles para todo el público. La gama de estos vehículos todavía no es igual a la de los vehículos tradicionales de gasolina y diésel. Además, la producción de electricidad tampoco se resuelve siempre de una forma totalmente respetuosa con el medio ambiente. Otros combustibles que se pueden mencionar son los biocombustibles, que son productos residuales de nuestros desechos domésticos y de la agricultura. El alcohol o etanol es un combustible que existe desde hace bastante tiempo como complemento de los automóviles que funcionan con gasolina. El aceite de colza también es una alternativa a los combustibles fósiles. Ninguno de estos combustibles alternativos aumenta las emisiones de dióxido de carbono, pero las mantiene en un nivel neutral. Son parte del ciclo natural.

El hidrógeno ha sido investigado durante varios períodos de nuestra historia mundial. Una pregunta relevante es por qué la investigación parece haber progresado en ciertos momentos y luego se ha ralentizado para luego volver a empezar. Los vehículos de hidrógeno que funcionan con pilas de combustible están comenzando a aparecer en algunas partes del mundo en autobuses de transporte público. Hoy en día los coches o camiones con motor de combustión interna que funcionan con hidrógeno no están a la venta, pero algunos fabricantes están cerca de lograr un vehículo terminado.

1. HISTORIA

1 HISTORIA

Este capítulo cuenta brevemente la historia del hidrógeno, desde el siglo XVIII hasta nuestros días. Aprenderá sobre algunas de las primeras invenciones de los motores de combustión de hidrógeno e ideas que aún son relevantes en el desarrollo del hidrógeno en la actualidad.

PALABRAS CLAVE:

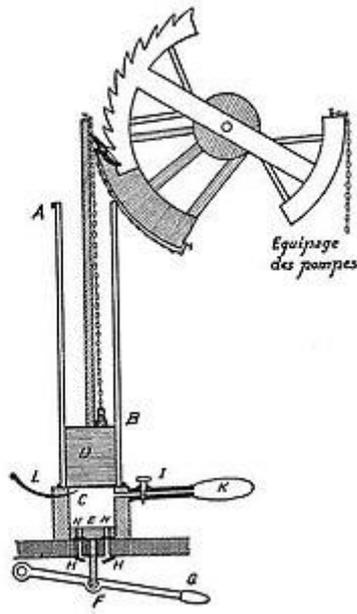
historia del hidrógeno, automóvil, Rivaz.

PROBLEMÁTICAS

1. Quién fue el hombre que tuvo por primera vez un motor de combustión interna funcional?
2. Qué obligó al rápido cambio en el uso de combustible en Leningrado en 1941?
3. De qué manera fue 1966 un año exitoso en cuanto al desarrollo del hidrógeno?

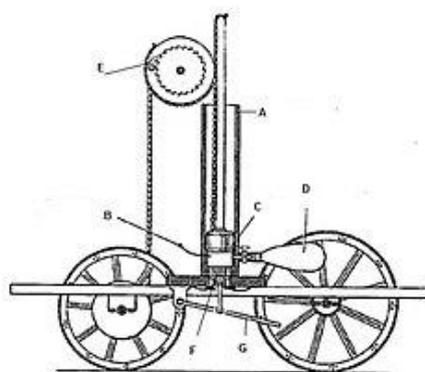
Sabemos alrededor del año 1700 se intentó inventar carruajes autónomos, sin utilizar un caballo como medio de transporte. El francés Cugnot construyó un carro propulsado por una máquina de vapor, y su propósito era llevar un cañón para el ejército. Este carro de movimiento automático recibió el nombre de automóvil de la palabra griega autos que significa uno mismo y la palabra latina mobilis que significa movimiento. Desafortunadamente todo terminó muy abruptamente. El carruaje de Cugnot chocó contra una pared y quedó totalmente destruido.

Al leer la historia de los motores, te das cuenta de que Nicolaus Otto fue supuestamente el inventor del primer motor con cámara de combustión interna. El motor Diesel fue inventado por Rudolf Diesel; también nombró al combustible. Todo esto tuvo lugar en algún momento a mediados de 1800, desafortunadamente es difícil ser preciso debido a cuándo se patentó la invención. Otto fue el primero en utilizar el motor de cámara de combustión interna moderno en 1876, pero incluso antes de eso, Etienne Lenoir inventó con éxito un motor de cámara de combustión interna para uso comercial alrededor de 1860. Con todo esto en mente, un caballero llamado François Isaac de Rivaz lo inventó incluso antes que Étienne, Rudolf y Otto. Nació en Francia en 1752 y luego se mudó a Suiza donde se convirtió en inventor y político. A principios del siglo XIX, François había fabricado un motor primitivo.



Primera versión del motor de Rivaz's (Imagen 1)

Un poco más tarde inventó también un carruaje sin caballos propulsado por otro de sus motores. Se afirmó que este era el primer motor de cámara de combustión interna del mundo impulsando un automóvil. Alrededor de 1809, éste dio la vuelta al lago de Ginebra.

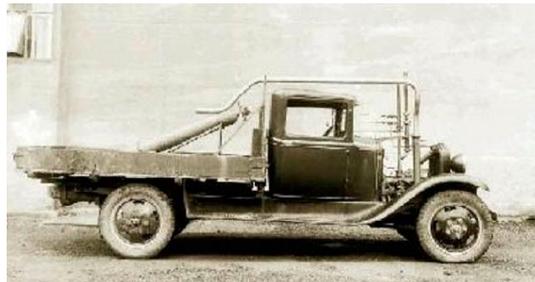


One of Rivaz's early wagons (Imagen 2)

Pero se ve que François había llegado temprano para su tiempo, ya que pocos creyeron en su trabajo y afirmó que su invento nunca podría competir con las máquinas de vapor. Pero el combustible usado por François no fue ni diesel ni gasolina sino que fue hidrógeno.

Medio siglo más tarde, en 1860, otro inventor francés llamado Etienne Lenoir, desarrolló el Hipomóvil de tres ruedas. El hipomóvil de Lenoir estaba propulsado por un motor de dos tiempos con un cilindro. El hidrógeno se producía electrolizando agua y el gas alimentaba al motor.

El siguiente automóvil de hidrógeno en ser inventado en Noruega en 1933, cuando la compañía eléctrica Norsk Hydro de Noruega fabricó un camión pequeño. El camión estaba equipado con un reformador de amoníaco que producía hidrógeno alimentando al motor de cámara de combustión interna.



Primer camión noruego propulsado con hidrógeno (Imagen 3)

En 1941 durante la guerra, el ejército nazi alemán había rodeado Leningrado y los vehículos militares se quedaron sin gasolina. Esta falta les obligó a ser inventivos. Por lo tanto, el ruso Boris Shelishch, convirtió 200 camiones GAZ-AA para que funcionaran con hidrógeno, demostró que se quemaban más limpiamente y funcionaban mejor que los de gasolina. Por alguna razón, todos los documentos detallados sobre el hidrógeno como combustible alternativo desaparecieron misteriosamente después de la Segunda Guerra Mundial, y aún siguen faltando.

En 1959 Harry Karl Ihrig modificó un tractor agrícola Allis-Chalmers para crear el primer vehículo de la historia propulsado con pila de combustible. Estas pilas no están descritas aquí pero sí se indica que hubo un desarrollo paralelo continuo en ambos caminos para buscar alternativas al combustible fósil en esta época temprana de la historia.¹

¹(Museo Nacional de Historia Americana, n.d.)



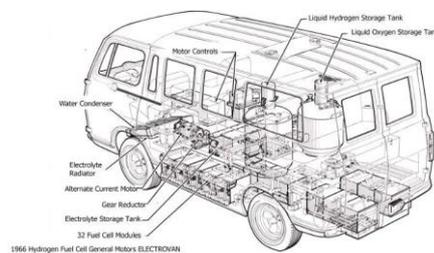
Tractor con pila de combustible de Harry Karls Ihring (Imagen 4)

1966 fue un año exitoso para el hidrógeno tanto para motores de cámara de combustión interna como para vehículos de pila de combustible. Roger Billings convirtió una camioneta Ford Model A para que su motor de gasolina funcione con combustible de hidrógeno.



La Model A de Roger Billings convertida al hidrógeno, 1966 (Imagen 5)

Este mismo año, General Motors creó el vehículo de pila de combustible GM Electrovan, que es reconocido por muchos como el primer automóvil de la historia propulsado por pila de combustible.



Primera furgoneta de GM propulsado por pila de combustible. 1966 (Imagen 6)

Desde entonces se ha desarrollado tanto el uso del hidrógeno en motores de cámara de combustión interna como en vehículos de pila de combustible.

2. EL GAS HIDRÓGENO

Este capítulo describe brevemente tanto lo que es el gas hidrógeno como uno de sus procesos de fabricación sin huella ambiental. Presenta también diferentes tipos de vehículos impulsados por hidrógeno. La producción de gas hidrógeno se explica con más detalle en un módulo diferente.

PALABRAS CLAVE:

producción de gas hidrógeno, relación de peso, embarcaciones propulsadas por hidrógeno, electrocombustible.

PROBLEMÁTICAS

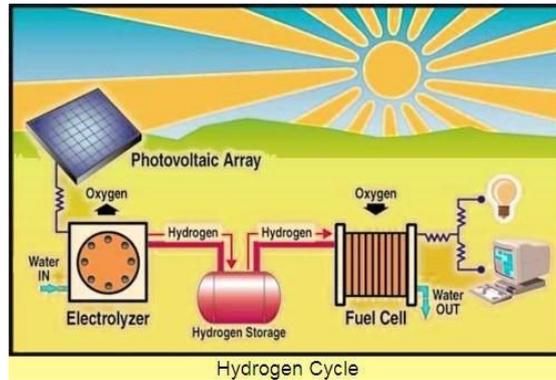
- 1.Cuál es la relación en peso de aire y de gas hidrógeno?
2. Dónde se puede refinar el hidrógeno?
3. Qué tipo de vehículo o embarcación podrían ser propulsados por hidrógeno?

El gas hidrógeno es el más ligero de todos los elementos del universo. Es unas 14 veces más ligero que el aire y esto significa que el hidrógeno se esparce muy rápidamente en caso de fuga. El hidrógeno consta de dos átomos de hidrógeno y, por lo tanto, tiene la designación química H_2 . Es incoloro, inodoro, no tóxico y altamente inflamable. El hidrógeno es la sustancia química más abundante en el universo y constituye aproximadamente el 75% de toda la materia normal. En la tierra es mucho menos frecuente. Es solo un 0,15% de su masa y se encuentra unido a varias formas de materia, por ejemplo, en agua, H_2O .

Producción de hidrógeno

La primera vez documentada en la que se produjo hidrógeno artificialmente fue a principios del siglo XVI con ácidos que reaccionaban con varios metales. Hoy en día, hay varias formas de producir hidrógeno que afectan más o menos al medio ambiente. Se está trabajando constantemente para tratar de producirlo de la manera más ecológica posible. La forma más respetuosa del medioambiente de producir hidrógeno es con energía solar o con turbinas eólicas, pero incluso estos métodos tienen un cierto efecto negativo sobre el medio ambiente.²

²Kumar (2016)



Hydrogen produced by solar energy (Image 7)

Daremos una explicación muy simplificada de una de las formas de producir hidrógeno: la división del agua. Se hace electrificando agua para separar el oxígeno del hidrógeno. Se usa preferentemente agua salada porque conduce mejor la electricidad. El resultado es que se produce oxígeno e hidrógeno en forma gaseosa. Este proceso se puede llevar a cabo en casa con precauciones ya que el hidrógeno es un gas muy inflamable.³

Tipos de vehículos

El desarrollo ha avanzado mucho y hoy se puede usar hidrógeno en todo tipo de vehículo. Los principales fabricantes de vehículos en el mundo están probando automóviles en los que han desarrollado motores que funcionan solo con hidrógeno, o más bien los han modificado para que funcionen solo con hidrógeno. Lo que hay que añadir aquí es que el desarrollo se mueve a una velocidad tan alta que es difícil estar completamente al día en el tema, y lo que aquí se escribe hoy puede ser obsoleto mañana. Autobuses de hidrógeno con motores de combustión tradicionales se han puesto en marcha con éxito en varias partes del mundo.



Autobus con motor convencional propulsado por hidrógeno, Keyou es la empresa de fabricación (Imagen 8)

³(Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables, 2019)

Uno de los problemas es que aunque las emisiones de óxido de carbono, CO, y de dióxido de carbono, CO₂, sean casi inexistente, el contenido de óxido de nitrógeno, NOx sí es alto. Se lucha de diferentes maneras para reducirlo a un nivel aceptable. En un proceso de combustión se utiliza aire y el nitrógeno del aire se convierte luego en óxido de nitrógeno, por lo que estos vehículos no cumplen los requisitos para ser clasificados como vehículos con cero emisiones, pero la investigación sigue teniendo éxito también en esto. Llegaremos a esto más adelante y explicaremos cómo trabajar con esto. Asimismo, dentro del otro sector de vehículos pesados, se está investigando el uso de hidrógeno como combustible para los motores de combustión interna ya existentes. Los comerciantes de larga distancia que son completamente dependiente de combustibles fósiles pronto dejarán de serlo.

En teoría, hoy ya se puede conducir sin ningún combustible fósil y utilizando el hidrógeno como combustible exclusivo. Se ha demostrado que los motores de hidrógeno funcionan al menos tan bien como los de diesel, y la potencia del motor, la rotación y la eficiencia del combustible son tan buenos como antes. Algunas empresas en desarrollo en los campos de inyección de combustible incluso afirman que su producto arroja cifras más altas tanto en el efecto como en la rotación. Además, se evitan por completo los problemas que tienen los propietarios de coches eléctricos con respecto a las estaciones de carga y el tiempo de carga, porque en el sector del transporte, el tiempo es oro.

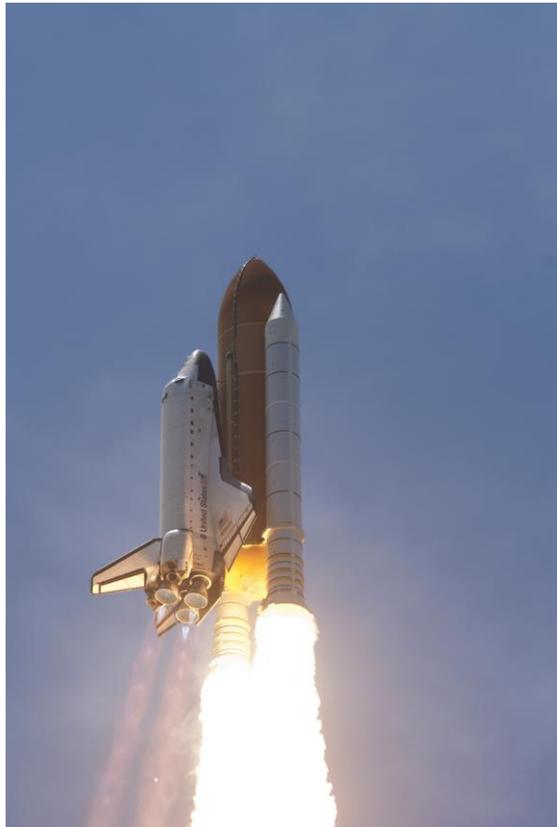
Lo mismo ocurre en el sector marítimo pero aquí se llega a un objetivo ambiental aún mayor ya que ni hay limitaciones en cuanto a la disponibilidad del combustible ni tampoco hay desechos. Hoy en día se está probando el hidrógeno en varios barcos

La aviación también está desarrollando fuentes alternativas de propulsión para aeronaves, y una de ellas es el hidrógeno. Recientemente se han realizado intentos exitosos de vuelos con hidrógeno. En estos casos se había mezclado con electrocombustible. Electrocombustible es un nombre colectivo para los combustibles que contienen carbono producidos principalmente por electricidad. Los átomos de carbono en el combustible provienen del dióxido de carbono recolectado en el aire, el mar o de los gases combustibles de las plantas de energía. Se puede hablar en cierto modo de una forma de reciclaje de dióxido de carbono.



Se prueban diferentes tipos de aviones (Imagen 9)

En naves espaciales también se ha usado hidrógeno pero en su forma líquida, junto con oxígeno líquido. Los tanques tenían 15 pisos de altura y contenían 530.000 litros de oxígeno líquido y 1,5 millones de litros de hidrógeno líquido. Estos se gasifican en una cámara de combustión y proporcionan propulsión a la nave. Esta cantidad tan grande de combustible se agotó en 8 minutos y 20 segundos.



Una nave espacial cargada de hidrógeno y de oxígeno (Imagen 10)

En resumen, se puede afirmar que el hidrógeno como combustible se puede utilizar en más o menos todo tipo de vehículos o nave. Sin embargo, de momento el desarrollo no ha despegado realmente en el sector de los coches, pero varios prototipos están siendo desarrollados por varios fabricantes de diferentes partes del mundo.

3. EL REPOSTAJE

En el siguiente capítulo se presentan los riesgos relacionados con el repostaje de hidrógeno, las ventajas comparado con la recarga de vehículos eléctricos y el futuro del combustible y repostaje de hidrógeno.

PALABRAS CLAVE:

Repostaje, riesgos potenciales, gasolina y diesel en comparación con el hidrógeno.

PROBLEMÁTICAS

1. Qué ventaja tiene repostar con hidrógeno frente a cargar un vehículo eléctrico?
2. Por qué se presuriza el hidrógeno hasta llegar a cifras tan altas?
- 3.Cuál podría ser un riesgo para la seguridad al repostar hidrógeno?

A día de hoy (mayo del 2022) en Suecia, el reabastecimiento del combustible se puede realizar en cinco ubicaciones en Suecia, y en Europa hay un total de aprox. 230 estaciones donde repostar hidrógeno. Alemania lidera el camino con sus 101 estaciones, seguida de Francia con 41 estaciones, Gran Bretaña tiene 19, Suiza 12 y los Países Bajos 11. Solo se puede suponer que la falta de estaciones

de servicio está obstaculizando actualmente el desarrollo para cambiar al hidrógeno, pero el desarrollo también está en marcha aquí adelante.⁴



Está claro que hace falta que haya muchas más gasolineras que suministren hidrógeno para normalizar el desarrollo (Imagen 11).

La gran ventaja de repostar hidrógeno en comparación con cargar un coche eléctrico se encuentra en términos de tiempo. Es tan corto como repostar un coche de gasolina o de diésel. Se tarda entre 2 y 5 minutos dependiendo del tamaño del depósito. Cargar un coche eléctrico en casa lleva unas 8-12 horas mientras que en una estación de carga, el voltaje más alto del cargador rápido permite acortar la carga a unos 20 minutos. Pero, esto solo permite cargar el 80% de la batería, no es una carga completa.

El repostaje de hidrógeno se realiza desde un depósito de presión que presuriza. La presión en el depósito de un camión es de 350 bar y en un automóvil es de 700 bar. El gas está presurizado para acomodar más, pero como se mencionó anteriormente, hay un desarrollo constante, lo que significa que esas cifras ya podrían haber cambiado.



La boquilla de llenado de gas es muy similar a las que se utilizan en otros gases para vehículos (Imagen 12).

⁴(Autovista SE, n.d.)

La evaluación del riesgo de que pueda ocurrir un accidente al repostar se presentará en un módulo diferente que se concentra precisamente en ese asunto: "Estaciones de carga". Pero debido a la alta presión en los depósitos, existe un riesgo potencial de fuga, ya que el gas es muchas veces más liviano que el aire. La presión aumentará y, dado que el repostaje suele realizarse al aire libre, aumenta rápidamente y se mezcla con el aire. Si, por el contrario, queda atascado bajo un techo y se produce algún tipo de ignición térmica, existe un gran riesgo de incendio rápido. Por tanto, es de gran importancia que existan sensores que puedan dar una alerta temprana de fugas de gas y que los locales en los que se puedan producir fugas estén equipados para que los dispositivos de ventilación puedan activarse rápidamente.

3.1 REPOSTAR EN CASA

Podría ser posible repostar en casa. Ya podemos cargar nuestro propio coche eléctrico, así como el de otras personas. Entonces basta con tener el equipo adecuado para comprimir el gas para tenerlo en un vehículo. En el caso de que queramos ser respetuosos del medio ambiente, se tendrá que hacer con placas solares o turbinas eólicas para producir electricidad verde.



Aquí vemos una estación de combustible para uso doméstico desarrollada por Honda. Ésta proporciona también electricidad al hogar mediante una pila de combustible. (Imagen 13)

3.2 GASOLINA Y DIESEL

Hemos dependido de la gasolina y del diésel durante casi 150 años para propulsar todos nuestros vehículos y embarcaciones en las carreteras, el agua y el aire. En realidad, también había otras opciones hace más de cien años que probablemente estaban cerca de tener éxito. La electricidad, por ejemplo, iba muy avanzada: hace más de 100 años existían muchos tipos de vehículos eléctricos. Los récords de velocidad de más de 200 km/h con coches eléctricos se establecieron en las vías de alta velocidad a principios del siglo pasado en América. Los vehículos a vapor también eran una opción, no solo los trenes sino también los coches. Pero entonces, ¿Por qué fueron la gasolina y el diésel quienes

ganaran la partida? No podemos obtener respuesta a esta pregunta. Otra pregunta relevante es; ¿Cómo habría sido el medio ambiente hoy si se hubieran encontrado otras alternativas entonces?

¿Habríamos tenido el aumento global de la temperatura que tenemos hoy si hubiéramos invertido en otra cosa en lugar de diésel y gasolina? Pero el caso es que cuando el coche y el motor de combustión hicieron su entrada a principios del siglo pasado, se consideró una buena inversión medioambiental, las grandes ciudades del mundo tenían grandes problemas con todos los caballos dentro de las ciudades que tiraban de carretas llenas de bienes y de personas. Un gran problema era que los caballos también tenían que cumplir con sus necesidades naturales, tanto la número 1 como la número 2 y, por supuesto, esto se hacía en todas partes del centro de la ciudad.



Así se veían las ciudades a principios del siglo pasado, el olor tenía que ser distinto (Imagen 14).

Además, esto era algo que los caballos hacían a cualquier hora del día independientemente de si iban andando o no, a diferencia del automóvil que dejaba de consumir gasolina o diesel y de emitir gases en cuanto se apagaban.

El hidrógeno, en cambio, en esta época no se usaba casi nada. Sin embargo sí que se usó como gas ligero en vez del helio para cruzar el Atlántico con un zeppelin. Ferdinand Adolf Heinrich Von Zeppelin, nacido en Alemania a principios del siglo XIX, fue el hombre detrás de estas artesanías. Dado que Estados Unidos en ese momento era el líder mundial en la producción de helio pero al mismo tiempo no permitía la exportación, la nave se llenó de hidrógeno. Desafortunadamente, junto con el aire o el oxígeno se vuelve muy inflamable. En 1937 durante un vuelo con el Zeppelin Hindenburg en América al aterrizar se incendió repentinamente. Se cree que fue alcanzado por un rayo, pero aún hoy no está claro si esto fue lo que provocó el accidente o si se trató de un sabotaje. En cualquier caso, todo quedó grabado en una película. La embarcación se hundió rápidamente en el suelo y el avance del fuego fue muy rápido. Murieron 35 personas a bordo y una en tierra. Decir que este accidente haya llevado a un gran escepticismo en cuanto al hidrógeno es una especulación. Pero la terrible película del desastre

no le ha dado buena prensa al hidrógeno. En cualquier caso, el desastre del Hindenburg marcó el fin de la era de los grandes dirigibles, para la época.⁵



El lujoso dirigible Hindenburg captado por la cámara cuando ocurrió el desastre de 1937 en el que 36 personas murieron (Imagen 15)

Hoy se ha reanudado el desarrollo en el campo de los grandes dirigibles, pero aún no está claro si se van a inflar con hidrógeno o helio. El motivo del renovado interés es que los dirigibles son mucho mejores para el medio ambiente que los aviones regulares.

4 EL PRINCIPIO DE CUATRO TIEMPOS EN UN MOTOR OTTO Y DIESEL

Este capítulo explica los principios de dos tipos de motores que podrían usarse con hidrógeno como combustible: el motor Otto y el motor Diesel. Trata también del principio de cuatro tiempos relacionado con estos motores.

PALABRAS CLAVES:

Motor Otto, motor Diesel, motor de cuatro tiempos.

PROBLEMÁTICAS

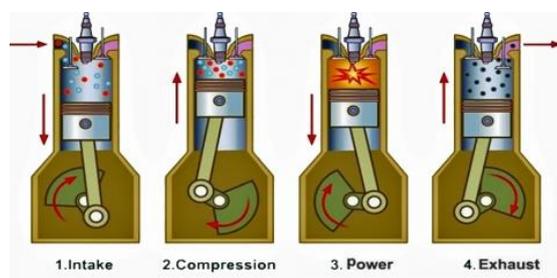
1. Cómo se crea la presión negativa en el cilindro?
2. Cómo se enciende el combustible en un motor Otto?

⁵.(SO-rummet, 2022)

3. Cómo se enciende el combustible en un motor diesel?

Estos son los principios fundamentales del motor de cuatro tiempos, tanto el Otto como el Diesel que comprime el Hidrógeno como combustible. Como lo indica su nombre, todo el proceso de trabajo se lleva a cabo en cuatro fases. Un golpe es el movimiento del pistón de un punto muerto a otro, por ejemplo, del punto muerto superior al punto muerto inferior o viceversa. El término punto muerto significa que cuando el pistón alcanza su posición inferior en el cilindro, o superior, se frena tanto que generalmente se dice que está parado antes de que invierta la dirección y vaya en la otra dirección, alcanza su punto muerto y en los diferentes trazos, diferentes cosas suceden. El punto muerto superior a veces se abrevia como PMS y el punto muerto inferior como PMI. En un ciclo de trabajo, el cigüeñal gira dos revoluciones, el árbol de levas gira una. Se requiere al menos una válvula de entrada y una válvula de salida para cada cilindro. Se requiere una bujía para encender la mezcla de aire y de combustible.

4.1 EL MOTOR OTTO



Los cuatro tiempos en un motor Otto (Imagen 16)

4.1.1 FASE 1. FASE DE ADMISIÓN

Esta fase comienza cuando el pistón está en el punto muerto superior. La válvula de admisión se abre y, a medida que el pistón baja, se crea un efecto de succión que introduce el combustible en el cilindro. Se inyecta gasolina en un momento específico y se mezcla con el aire. La válvula de

salida está cerrada. Si el motor es de inyección directa, solo se aspira aire y el combustible se inyecta directamente en la cámara de combustión en el momento que se considera óptimo. Si el motor está sobrealimentado y se usa un compresor de escape, un turbocompresor o un compresor mecánico accionado por algún tipo de correa o cadena, la mezcla se presiona utilizando la sobrepresión creada por ella.

4.1.2 FASE 2. FASE DE COMPRESION

El pistón está ahora en el punto muerto inferior y mirando hacia arriba. La válvula de entrada se cierra, la válvula de salida permanece cerrada, a este ritmo se comprime la mezcla aire-combustible. Cuando se comprime la mezcla de aire y combustible, el efecto sobre el motor aumenta y la combustión se vuelve más eficiente. Justo antes de que el pistón alcance su punto muerto superior, la mezcla de combustible y aire se enciende con una chispa de la bujía.

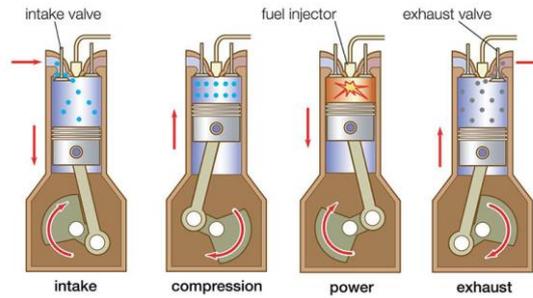
4.1.3 FASE 3. FASE DE COMBUSTION O EXPLOSIÓN

En este momento, la mezcla de aire y combustible acaba de encenderse y se expande a alta velocidad, lo que hace que el pistón sea empujado hacia abajo con una fuerza muy grande. La válvula de entrada está cerrada, la válvula de salida también está cerrada. Este golpe es el único que crea la potencia de las cuatro fases.

4.1.4 FASE 4. FASE DE ESCAPE

En esta fase, el pistón se mueve hacia arriba en el cilindro. La válvula de salida está abierta, esto permite que los gases de escape, que antes eran combustible y aire, sean expulsados hacia afuera primero a través del puerto de escape y luego a través del tubo de escape.

4.2 LAS CUATRO FASES DEL MOTOR DE DIESEL



Las cuatro fases de un motor de Diesel (Imagen 17)

Un motor Diesel es muy similar a un motor Otto. Se requieren cuatro fases al igual que en el motor Otto. También se requiere al menos una válvula de entrada y una válvula de salida para cada cilindro. El cigüeñal gira dos revoluciones para completar un ciclo de trabajo, y el árbol de levas una revolución. Pero como el combustible no es gasolina, no se requiere una bujía. El diesel se enciende por el alto calor en el cilindro. El alto calor se logra por el hecho de que un motor Diesel tiene una compresión significativamente mayor que un motor Otto. La compresión es de aproximadamente 20-30 bar.

4.3 EL MOTOR DIESEL

4.3.1 FASE 1. FASE DE ADMISIÓN

El pistón se mueve hacia abajo del cilindro, la válvula de entrada está abierta y la válvula de salida está cerrada. La presión negativa creada en el cilindro ayuda a aspirar aire. Si el motor está sobrealimentado con un compresor de escape, un turbocompresor o un compresor mecánico accionado por una correa o similar, fuerzan el aire hacia el cilindro.

4.3.2 FASE 2. FASE DE COMPRESION

El pistón ahora se mueve hacia arriba en el cilindro. La válvula de entrada está cerrada y la válvula de salida también permanece cerrada durante esta fase. El aire ahora está comprimido y se calienta por la presión alta. Justo al final de la fase de compresión, el diésel se inyecta en el aire caliente y se enciende por la alta temperatura. Un motor Diesel siempre tiene la inyección de diesel directamente en la cámara de combustión, nunca en el colector de admisión como en la mayoría de los motores de gasolina. Durante los arranques en frío, el aire debe calentarse, una llamada bujía incandescente se encuentra dentro de la cámara de combustión. Esta calienta el aire a la temperatura requerida para que se encienda el diesel.

4.3.3 FASE 3. FASE DE COMBUSTION O EXPLOSIÓN

El diesel encendido se expande rápidamente y empuja el pistón hacia el interior del cilindro. La válvula de entrada está cerrada, la válvula de salida también está cerrada. Esta es la fase que proporciona potencia al tren motriz. El diesel y el aire ahora se han convertido en gases de escape.

4.3.4 FASE 4. FASE DE ESCAPE

El pistón se mueve hacia arriba en el cilindro. La válvula de entrada está cerrada. La válvula de salida se ha abierto. El pistón ahora empuja los gases de escape a través de la válvula de salida abierta más a través del puerto de escape y del tubo de escape.

5 CÓMO FUNCIONA EL HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA?

En el siguiente capítulo, se explica paso a paso la facilidad con la que se puede convertir un motor Otto o Diesel, en un motor de hidrógeno. Este capítulo también explica cómo inyectar y encender el hidrógeno en un motor convertido de diferentes maneras y los riesgos potenciales cuando falla el encendido.

PALABRAS CLAVES:

Encendido, tiempo de encendido, inyección de combustible, conversión.

PROBLEMÁTICAS:

1. ¿Cuál tiene la combustión más rápida: el hidrógeno o la gasolina?
2. ¿El autoencendido puede llegar a ser un riesgo para el motor?
3. ¿Por qué no se debe usar bujías recubiertas de platino en motores de hidrógeno?

Un motor de combustión de gasolina o diésel puede funcionar con hidrógeno? Sí, pero hay que hacer ciertos cambios. Ya hemos dicho que la velocidad de combustión es mucho más rápida con hidrógeno que con gasolina y diésel. ¿Cómo se maneja esta velocidad? Cuando se hace funcionar un motor con gasolina, debe tener un encendido anterior a altas revoluciones para que todo el combustible tenga tiempo de quemarse antes de que comience la siguiente fase. De lo contrario, corre el riesgo de perder potencia, aumentar los gases de escape y dar temperaturas más altas al motor. Con hidrógeno es casi lo contrario: no se puede usar el sistema de encendido tradicional de un motor de combustión de gasolina. Debido a la inflamabilidad del hidrógeno, existe el riesgo de que se produzca una ignición demasiado pronto, lo que en ese caso puede provocar picos, lo que también puede provocar peores

gases de escape. Un motor que continúa usándose de esta manera corre el riesgo de sufrir daños importantes en el motor, en los pistones y en las válvulas. En el peor de los casos se puede romper el motor. Este problema se puede resolver con un encendido posterior, justo antes de que el pistón haya alcanzado su punto muerto superior, o cerca de cero. Esto funciona bien con el combustible de hidrógeno porque la velocidad de combustión es muy alta. A bajas revoluciones, por otro lado, es una ventaja si tiene un encendido ligeramente más alto. En términos simplificados, se podría decir que hace falta un sistema de encendido que funcione exactamente al revés de un sistema de encendido tradicional.

5.1 CONVERSIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA PARA QUE FUNCIONE CON HIDRÓGENO

En principio, es posible convertir un motor de combustión interna para que funcione solo con hidrógeno en lugar de funcionar con gasolina/diésel. Explicaremos dos formas aquí, pero hay más.

Cuando se dice que es "posible", se utilizan comillas. Convertir, reconstruir y modificar, es mucho más trabajo de lo que esperaba inicialmente. En el momento de escribir este artículo, aún no se han encontrado kits de conversión prefabricados en el mercado, tal vez nunca los haya.

La siguiente pregunta que surge es ¿qué tipo de motor y qué modelo podemos convertir?, pero nos ceñiremos a explicaciones generales sin profundizar demasiado en los detalles. Hay empresas hoy en día que fabrican kits de conversión para GNC, gas natural comprimido, GNL, gas natural licuado y estos gases son muy similares al hidrógeno.

5.1.1 FASE 1

Lo primero que se debe de tomar en cuenta es el sistema de combustible. El depósito debe ser reemplazado por uno que pueda manejar la alta presión de 700 bar. Conseguir un depósito de este tipo será un desafío en sí. Actualmente no están disponibles en el comercio de accesorios para automóviles, pero hay empresas especializadas que desarrollan y producen depósitos para hidrógeno a alta presión, o se podría usar una botella de gas como alternativa.



Este es un ejemplo de un depósito de hidrógeno producido por la empresa Doosan (Imagen 18).

5.1.2 FASE 2

El siguiente paso es reemplazar todas las líneas de combustible ordinarias que anteriormente transportaban gasolina con una presión relativamente baja y un riesgo de fuga bastante bajo. El hidrógeno se almacenará a muy alta presión y también se transportará a través de tuberías desde el depósito hasta el motor, donde existe un alto riesgo de fuga en todas las conexiones. En otras palabras, todas las líneas que se instalen deben dimensionarse de acuerdo con la alta presión y el volumen.

Pasa lo mismo con todas las conexiones y accesorios, estos también deben cumplir con los requisitos para evitar fugas.



Diferentes racores para hidrógeno a alta presión (Imagen 19).

5.1.3 FASE 3

Luego, el motor obtendrá el combustible y, como se mencionó anteriormente, tomaremos dos enfoques diferentes. Lo que se debe de hacer, independientemente de los diversos enfoques, es reemplazar la(s) válvula(s) de inyección anterior(es) que anteriormente estaban diseñadas para gasolina con válvulas de inyección diseñadas para gas. Existen informes que demuestran que el uso de válvulas de inyección diseñadas para gas funcionan bien.

5.2 DOS FORMAS DE SUMINISTRAR EL MOTOR CON HIDRÓGENO

Una de las formas de suministrar hidrógeno al motor es a través de válvulas de inyección montadas en el colector de admisión en el exterior de la válvula de admisión y así permitir que el hidrógeno comience a mezclarse con el aire/oxígeno que ya está fuera de la cámara de combustión, y luego con la ayuda de la presión negativa del motor, se succiona al cilindro cuando se abre la válvula de admisión. Este modelo tiene cierto riesgo de autoignición porque el combustible entra en cuanto se abre la válvula de entrada y entonces puede haber riesgo de que el hidrógeno entre en contacto con piezas que tienen una temperatura tan alta que se inflame. Podría ser la bujía que tiene un calor demasiado bajo y aún brilla, podría ser carbón residual y depósitos de hollín del motor que anteriormente funcionaba con combustible fósil antes de la conversión. O residuos de aceite que son empujados hacia arriba entre la pared del cilindro y los anillos del pistón debido a una ventilación algo deficiente del cárter, que pueden brillar en el cilindro. La detonación de la mezcla de aire/combustible también puede ocurrir debido a la sincronización de la leva con una superposición demasiado alta y luego el combustible entra en contacto con el puerto de escape.

La otra forma en la que se puede suministrar hidrógeno al motor es utilizando el denominado modelo de motor de inyección directa. Esto significa que la válvula de inyección debe asentarse directamente en la cámara de combustión. La ventaja de este método es que puede controlar con mayor precisión el momento en que se realice la inyección.

5.2.1 FASE 4

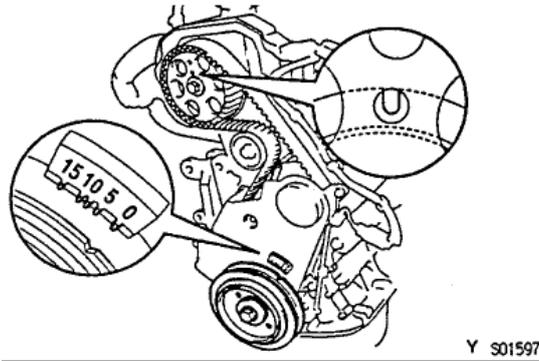
Debido a la naturaleza combustible del hidrógeno, el sistema de encendido también debe de convertirse, dependiendo de lo que tenga como punto de partida, debe hacerlo de diferentes maneras.



También se utiliza una bujía convencional en determinados motores de hidrógeno (Imagen 20).

Se puede resumir diciendo que el momento de encendido a altas velocidades del motor convertido al hidrógeno debe ser posterior al de gasolina tradicional, donde el tiempo de encendido es aproximadamente 25-35 grados antes del punto muerto superior. En el motor convertido al hidrógeno, el tiempo de encendido puede estar cerca de cero a altas velocidades del motor, debido a que la velocidad de la llama es muy alta.

Por otro lado, la velocidad de la llama disminuye con una mezcla más pobre, que por ejemplo ocurre a bajas revoluciones, por ejemplo en ralentí, pero también a baja carga, en el motor de gasolina el tiempo de encendido es de unos 10 grados antes del punto muerto superior, cuando en cambio, en el motor convertido a hidrógeno, debe ser un tiempo de encendido un poco más temprano para quemar toda la mezcla.



El momento debe retrasarse en comparación con un motor de gasolina (Imagen 21).

Esta modificación podría realizarse modificando el software en la unidad de control del vehículo de acuerdo con los tiempos de encendido deseados en las diferentes condiciones a las que estará expuesto el motor.

En un motor más antiguo con un distribuidor tradicional que funciona a la velocidad del árbol de levas, se podría usar un distribuidor que esté en la dirección opuesta a la que debería estar allí, lo que significaría que el tiempo de encendido se reduciría a mayores rpm.

Además, no se deben utilizar bujías con revestimiento de platino porque el platino actúa como catalizador entre el hidrógeno y el oxígeno y, en ese caso, puede producirse el riesgo de autoignición.

Al planificar la conversión de un motor de combustión interna regular que anteriormente funcionaba con combustible fósil que contenía carbono, es extremadamente importante dismantelar todas las piezas dentro y sobre el motor que puedan contener partículas de hollín. La culata debe desmontarse para acceder al hollín que suele producirse en la cámara de combustión. Las válvulas también se deben sacar para que también se puedan limpiar de hollín. También dentro de los puertos, especialmente en el lado de escape, se deben eliminar todas las partículas de hollín. En la parte superior de los pistones, generalmente hay depósitos de hollín que deben eliminarse.

Es importante realizar todo este trabajo para contrarrestar la autoignición que ocurriría si hubiera partículas de hollín residuales. El hidrógeno no produce depósitos de hollín porque no contiene carbono ni oxígeno.

6 LA FASE DE INVESTIGACIÓN

Hoy en día, los investigadores de todo el mundo están desarrollando y refinando la tecnología para motores que puedan funcionar mejor con hidrógeno. Trabajan en el suministro de hidrógeno al motor de diferentes maneras, esto se explicará con más detalle en el siguiente capítulo.

PALABRA CLAVE:

Encendido, inyección, diferentes sistemas de inyección.

STUDY QUESTIONS:

1. *Cuál es la forma más sencilla de alimentar el motor con hidrógeno?*
2. *Cuál de los gases de escape ha demostrado ser difícil de reducir a cifras razonables?*
3. *Explique por qué se usa la inyección piloto en un motor de hidrógeno.*

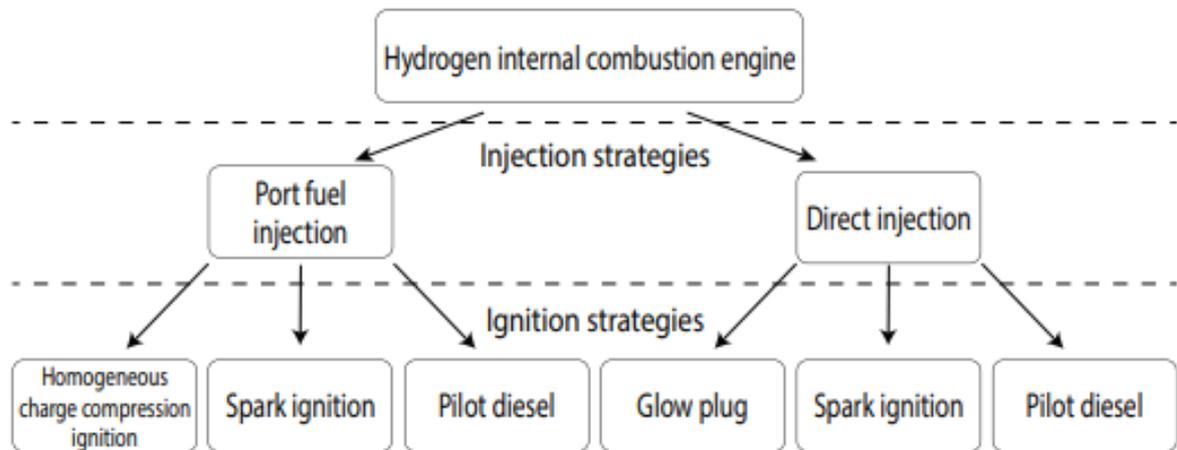
6.1.1 PUERTO DE INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO

La inyección se hace en el puerto de entrada en el colector de admisión. Lo que significa que el combustible se inyecta fuera de la válvula de entrada, es decir, no directamente en la cámara de combustión. Solo cuando la válvula de admisión se abre y el pistón se mueve hacia abajo, el combustible es succionado hacia el cilindro debido a la presión negativa que se crea, la carrera de admisión. Este tipo de inyección es el más común en los motores Otto. Convertir este sistema a una operación con hidrógeno es relativamente "simple", como cubrimos anteriormente. Los inyectores tienen que ser reemplazados para poder manejar hidrógeno en lugar de gasolina, y el sistema de encendido tiene que ser modificado, también mencionado anteriormente. Pero hay riesgos con este sistema que también mencionamos anteriormente, a saber, el autoencendido prematuro debido a que el combustible ingresa tan temprano. Otro problema con este tipo de sistema de inyección es que cuando el combustible se inyecta en el puerto de admisión, expulsa el aire y la potencia del motor se ve limitada. A continuación, se ofrece una descripción sencilla de los diferentes tipos de combustión, así como de los tipos ligeramente diferentes de ignición del combustible.

6.1.2 ENCENDIDO POR COMPRESIÓN DE CARGA HOMOGÉNEA, HCCI

Se podría hablar de ignición comprimida y cargada homogéneamente. Sin profundizar demasiado en la descripción de esto, se basa en que la inyección de hidrógeno se produce como describimos en el sistema PFI, es decir, en el puerto de entrada justo al lado de la válvula de entrada pero en el exterior

de la cámara de combustión. Se utiliza una mezcla homogénea de aire e hidrógeno, que también es muy pobre. Esta mezcla se inyecta directamente en la cámara de combustión y debido a su



inflamabilidad se enciende por la alta compresión y luego enciende el hidrógeno suministrado. Lo que ha demostrado ser una gran ventaja de este sistema es que el NOx se ha reducido a cifras realmente bajas como producto residual en los gases de escape aunque se mantenga la potencia del motor. El óxido de nitrógeno está cerca de cero. Pero incluso a este sistema le hace falta un mayor desarrollo para funcionar. Le hace falta por ejemplo una compresión muy alta.⁶

Diferentes métodos de inyección para motor de combustión interna (Imagen 22)

⁶ Ibid. s. 7

6.1.3 INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE EN EL PUERTO DE ENCENDIDO POR CHISPA

Este sistema, que se describe en inglés como PFI SI, SI significa Spark Ignition, es decir, un encendido del combustible con la chispa de una bujía. PFI con SI es el sistema más investigado cuando se trata de motores de combustión interna de hidrógeno. Este sistema, si tiene una mezcla de aire/combustible extremadamente pobre, podrá llegar a cifras muy bajas de NOx en los gases de escape, por debajo de 100 ppm sin ningún tratamiento externo.

Es también importante reducir la cantidad de productos residuales no deseados en relación con la combustión. Esto se puede lograr a través de relaciones estequiométricas.

Las relaciones estequiométricas podrían describirse de manera simplificada en el sentido de que la cantidad precisa y correcta de materia junto con otra materia de cantidad precisa y correcta se incluye en una combustión en la que todo se enciende. Esto también, elimina cualquier residuo no deseado. El uso de un sistema de Recirculación de Gases de Escape reduce aún más el NOx. Lo que significa que una pequeña cantidad de gases de escape recircula en el proceso de combustión para disminuir la temperatura de combustión y, por lo tanto, reduce las cifras de NOx que se forma a altas temperaturas.⁷

También se utiliza un convertidor catalítico de tres vías, que reduce aún más el valor de NOx. Este llega a valores cercanos a cero. En lugar de Recirculación de Gases de Escape, a veces se utiliza la inyección de agua en el colector de admisión porque tiene el mismo efecto, ya que en la combustión de hidrógeno solo hay vapor de agua como producto residual. Este sistema tiene, como hemos experimentado anteriormente, algunos problemas, como el encendido prematuro no deseado de la mezcla o el petardeo que conduce a pérdidas de potencia del motor.

6.1.4 ENCENDIDO PILOTO DE COMBUSTIBLE CON INYECCIÓN DE HIDRÓGENO EN PUERTO

Este sistema se basa en tener inyección directa DI y PFI. La inyección directa es para dar la llamada "inyección piloto", esto significa que inyecta una pequeña cantidad de diesel directamente en la cámara de combustión. El diésel se enciende por el calor de la compresión y cuando posteriormente se inyecta hidrógeno en este se enciende. Pero incluso este sistema tiene ciertas desventajas, como el autoencendido no deseado. El contenido de NOx también es demasiado alto para que este método

⁷ Ibid. s. 8

se clasifique como de emisión cero, pero se están realizando más estudios en laboratorios. Pero a pesar del hecho de que los sistemas PFI son relativamente fáciles de convertir a la operación de hidrógeno, tal vez deberían verse más como una transición de nuestros motores habituales de combustión de fósiles a motores más avanzados que, con suerte, llegaran a existir pronto.⁸

6.1.5 COMBUSTIÓN DE HIDRÓGENO CON INYECCIÓN DIRECTA

Agregar el hidrógeno directamente al cilindro durante la carrera de compresión parece ser el concepto más prometedor en el desarrollo actual de los motores. Al hacerlo de esta manera, puede evitar más o menos autoencendidos no deseados o petardeo que ocurren en el sistema del motor PFI. Porque el tiempo de inyección de combustible se puede regular como se desee. Puede esperar para inyectarlo tan tarde que ambas válvulas estén cerradas, lo que minimiza la exposición de las piezas calientes.

El problema del hidrógeno es que ocupa mucho espacio cuando se inyecta a través del colector de admisión y luego también ocupa el lugar del suministro de aire. Esto, a su vez, contribuye a la pérdida de energía de la que también se deshace. Esto se debe a que solo el aire ha sido succionado al cilindro a través de la válvula de entrada, y luego el combustible se suministra al cilindro cuando la válvula de entrada está cerrada. Sin embargo, al inyectar el combustible en la carrera de compresión, el inyector debe de tener una presión más alta debido a la presión más alta que prevalece dentro de un cilindro que la que se requiere de un inyector para el sistema PFI. En un sistema PFI, no hay exceso de presión en absoluto, sino que es principalmente una presión negativa. Se ha demostrado que este sistema, que trabaja con presiones tan altas, casi se puede comparar con la alta eficiencia del diesel. El sistema a menudo se abrevia con HPDI, que significa encendido directo de alta presión. Este sistema presenta muchas ventajas: se puede hacer más flexible en muchas situaciones diferentes y se puede ajustar de una manera completamente diferente a un sistema PFI. Se puede ajustar la presión de inyección, se puede ajustar la sincronización de inyección, se puede ajustar también el diseño de inyección para poder optimizar la potencia del motor al máximo. Hay algunas formas diferentes de encender el combustible como veremos más adelante.⁹

6.1.6 ENCENDIDO POR BUJÍA INCANDESCENTE

Las bujías incandescentes se utilizan normalmente para motores diésel cuando arrancan en frío. Luego arden durante un tiempo corto justo antes del momento de arranque para calentar la cámara de

⁸ Ibid. s. 8

⁹ Ibid. s. 9

combustión. Se apagan cuando el motor está en marcha. Pero es diferente cuando se usan para trabajar en un motor de combustión interna de inyección directa para combustible de hidrógeno. Aquí, la bujía incandescente debe estar encendida todo el tiempo y se requiere una temperatura de aproximadamente 900-1100 grados centígrados. Comparándolo con un motor diésel este método también tiene ventajas y desventajas: el motor de hidrógeno consume más combustible pero emite mucho menos NOx. Otro problema es que hoy en día las bujías incandescentes no puedan permanecer encendidas, pero tal vez este problema pueda resolverse en el futuro.¹⁰

6.1.7 ENCENDIDO POR CHISPAS CON BUJÍA

Este es probablemente el modelo más investigado y también el mejor documentado.

En muchos aspectos, es muy similar al modelo descrito en el párrafo anterior, encendido con bujías incandescentes. En este caso, la bujía incandescente ha sido reemplazada por una bujía. Puede haber varias bujías. Los estudios realizados en un motor mono cilíndrico convertido para inyección directa y que enciende el hidrógeno con bujía por chispa muestran una eficiencia térmica del 40 % a cargas de motor bajas a medias, que es solo un poco menor en comparación con un motor diésel equivalente.

Lo que también se ha observado con este modelo es que la sincronización de la inyección afecta la homogeneidad de la mezcla. Esto afecta significativamente la potencia del motor y las emisiones pero no afecta tanto a la sincronización del encendido. Retrasar la sincronización de la inyección de 120 grados antes del TDC a 65 grados antes del TDC aumenta aún más la potencia del motor. Desafortunadamente, esto da como resultado un aumento de las emisiones de NOx. Luego intentaron inyectar más aire para reducir el contenido de NOx. Funcionó, pero luego el efecto se redujo. El ángulo en el que el inyector inyecta el combustible en la cámara de combustión tiene también un gran impacto en el rendimiento del motor.¹¹

6.1.8 MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN DE INYECCIÓN DIRECTA DE ALTA PRESIÓN DE COMBUSTIBLE DUAL FUEL

Como mencionamos anteriormente, encender el hidrógeno con solo calor de compresión no es fácil. Aquí describiremos de forma relativamente simplificada lo que se ha pensado con esta tecnología.

¹⁰ Ibid. s. 9

¹¹ Ibid. s. 10 f.

Se retoman los modelos presentados anteriormente con el uso de una preinyección. También se le puede llamar inyección piloto. Puede ocurrir de esta manera: En la cámara de combustión hay un inyector que inyecta una pequeña cantidad de una sustancia que se enciende con la ayuda del calor de compresión, por ejemplo el diésel, se enciende y poco después se inyecta el hidrógeno y se enciende en la cámara de combustión. Sin embargo, en esta teoría no ha habido información que explique cómo funciona en la realidad con el hidrógeno. Por otro lado, se han hecho estudios con GNC, Gas Natural Comprimido, que tiene una inflamabilidad similar al hidrógeno.

Se han utilizado dos inyectores, uno para el diésel y otro para el gas. Se han usado diferentes ángulos de los inyectores y presiones distintas y han tenido efectos variados. Incluso en este modelo, han intentado inyectar el gas en diferentes momentos durante la carrera de compresión y esto ha influido en los resultados. También se ha probado con inyectores combinados donde el inyector está diseñado para que ambos combustibles estén en un mismo inyector.¹²



Este inyector dual esta desarrollado por la empresa Puerto Oeste. (Imagen 23)

¹²(Dimitriou and Tsujimura, 2017)

El problema es a pesar de que la cantidad de diésel sea muy pequeña, en la inyección piloto de diésel para iniciar la combustión del gas, se forma una capa de hollín. Es probable que se solucione cuando se reemplace el GNC por hidrógeno ya que el GNC contiene carbono.

6.2 PROS Y CONTRAS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS

Todos los métodos de inyección de combustible y de combustión tienen ventajas y desventajas. Se ha observado que los inyectores, por ejemplo, debido a que el hidrógeno no tiene un efecto lubricante como el diésel o la gasolina, han mostrado un desgaste que probablemente será un problema a largo plazo. Posiblemente esto podría solucionarse con la ayuda de algún tipo de lubricación, o tal vez tratando las partes que tocan el artículo con una superficie que asegure la fricción entre ellas.

6.2.1 FUNCIÓN DEL INYECTOR

Se ha demostrado que el inyector tiene un papel importante en el rendimiento del motor. Las características del inyector en términos presión y del tamaño de la boquilla están directamente relacionados con la calidad de la inyección, de la mezcla y con la forma de controlar la cantidad de inyección. Por lo tanto, el diseño de los inyectores afecta la pérdida de calor en las paredes del cilindro y la eficiencia del consumo de combustible.¹³

Lo que también ha salido a la luz es que el gas hidrógeno tiene un efecto de fragilización en ciertas aleaciones metálicas, lo que puede convertirse en un problema durante el uso a largo plazo.

Otros obstáculos que deben superarse son, por ejemplo, cómo manejar la capacidad de alta difusividad del hidrógeno, que le permite pasar a través de varios tipos de materiales diferentes.

Los inyectores, por ejemplo, pueden estar expuestos al hidrógeno, lo que puede provocar que la función se vea afectada o completamente cancelada.

Un requisito previo para el desarrollo del hidrógeno como combustible en motores de combustión interna es que uno se centre en los problemas que tiene:

- los diferentes materiales que pueden hacer frente a las diferentes propiedades del hidrógeno.
- Las altas presiones utilizadas en algunos de los sistemas presentados anteriormente.
- El diseño de las líneas de gas
- La posibilidad de sellar de forma segura todas las conexiones entre diferentes componentes.

¹³(Verhelst and Wallner, 2009)

- El diseño de los depósitos de combustible y una construcción sobre los mismos que asegura una estanqueidad absoluta.

Dado que los inyectores están diseñados específicamente para gas hidrógeno, hoy en día usamos muchos inyectores que en realidad están destinados a otros tipos de gases, GNC, GLP o BIOgas. Pero el desarrollo avanza constantemente y lo que se escribe hoy se puede dejar de ser válido mañana.

6.3 TRES TIPOS DE INYECCIÓN DIFERENTES

6.3.1 ACTIVACIÓN ELECTRO-HIDRÁULICA (NTSEL)

Este tipo de inyector requiere fluido hidráulico (generalmente diésel) a alta presión.

La presión de inyección está limitada a 200 bar. Durante la inyección propiamente dicha se activa el solenoide que luego libera la presión en el gasóleo que se encuentra en la parte superior del inyector, el hidrógeno que se encuentra a alta presión puede entonces levantar la aguja de inyección de su asiento y se produce la inyección. En este tipo de inyectores, debe haber una presión tan alta sobre el diésel que la aguja sella contra su asiento en la posición cerrada. El diésel también asegura que ciertas partes móviles del inyector estén lubricadas.¹⁴

6.3.2 ACTIVADO POR SOLENOIDE (WESTPORT)

La empresa Westport ha desarrollado este inyector, es su primera versión y está completamente accionado por solenoide para el combustible DI e hidrógeno. Está limitado a 150 bar. Tiene algunos fallos de funcionamiento y algunas restricciones de movimiento en la aguja.

Hoerbiger Valve TEC GmbH también ha desarrollado un solenoide similar también desarrollado para combustible DI e hidrógeno con una presión de inyección máxima de 100 bar.¹⁵

6.3.3 ACCIONADO PIEZOELÉCTRICO (WESTPORT)

Este es de segunda generación y puede soportar presiones de hasta 250 bar. Aquí la aguja es activada por un elemento piezoeléctrico, a partir de un voltaje analógico que regula el movimiento de la aguja

¹⁴ (Yip et al., 2019, s. 18)

¹⁵ Ibid. s. 17

y permite una respuesta muy rápida. Tiene un tiempo de apertura corto de 0,5 ms. Además, se mejora la vida útil debido al control flexible de la velocidad de la aguja, que permite reducir la velocidad de cierre, reduciendo así la presión de cierre.

7 CONCLUSIONES

Este capítulo destaca las ventajas de la conversión de los motores existentes y el transporte y la producción de vehículos y embarcaciones del futuro. También adopta un punto de vista más sentimental sobre el futuro de los vehículos antiguos. En un mundo donde los científicos constantemente encuentran nuevas soluciones y un mundo donde la humanidad se enfrenta con nuevos desafíos con el medio ambiente, estas son perspectivas que debemos de tener en cuenta.

PALABRAS CLAVES:

cambio de producción de motores, ventajas de conversión, ahorro de vehículos antiguos, el futuro del transporte de vehículos y embarcaciones. engine production, conversion advantages, saving vintage vehicles, the future of vehicle and vessel transport.

PROBLEMÁTICAS

- 1. Qué desafíos del futuro puede ayudar a resolver el hidrógeno?*
- 2. Cuáles son las ventajas de utilizar hidrógeno en un motor de combustión interna frente a una pila de combustible?*
- 3. Qué posibles ventajas y desventajas existen para el individuo como para la sociedad si se cambia a un futuro basado en el hidrógeno?*

7.1 LAS VENTAJAS DE CONVERTIR MOTORES EXISTENTES

Una ventaja que se ha encontrado al hacer funcionar motores de combustión interna con hidrógeno, en lugar de pilas de combustible, es que el hidrógeno no tiene que ser tan puro para funcionar en un motor de combustión interna como en uno con pilas de combustible. Otra ventaja que ve al usar motores de combustión interna es la posibilidad de cambiar entre diferentes tipos de combustible. Además, el uso de tecnología ya probada mantendrá bajos los costos en las fábricas.

No sabemos si los kits de conversión estarán disponibles en el futuro, pero sería más respetuoso con el medio ambiente deshacerse de combustibles fósiles lo antes posible.

7.2 POR QUÉ USAR HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

La siguiente pregunta parece legítima: ¿Por qué estamos tratando de desarrollar el motor Otto o el motor Diesel para que funcionen con hidrógeno cuando parece que ya están saliendo de la sociedad?

No tiene respuesta rápida y fácil. Es absolutamente cierto que el vehículo que utiliza la tecnología de pila de combustible tiene una mayor eficiencia que un motor Otto o un motor diésel que ha sido modificado para funcionar con hidrógeno.

Una forma de verlo es que ya tenemos una gran cantidad de motores Otto y diésel en el mundo. Estos motores siguen dominando el mercado en comparación con los vehículos eléctricos.

Será imposible reemplazarlos en poco tiempo, y al mismo tiempo es de suma importancia tomar acciones muy pronto, porque el medio ambiente está amenazado.

Convertir las fábricas que producen motores de combustión para que produzcan motores eléctricos será un gran desafío que tiene que suceder rápidamente. Lo mismo se aplica a la producción de baterías y las sustancias necesarias para ellas. Hoy en día solo se encuentran en cantidades limitadas en algunos lugares del mundo.

En algunas partes del mundo, no es financieramente factible a largo plazo, reemplazar el vehículo propio por uno eléctrico o de pila de combustible. En este caso reconstruir vehículos existentes podría ser una buena alternativa.

Lo mismo se aplica a la navegación, el tráfico pesado y los aviones, aquí la opción de reconstruir los motores existentes para la operación de hidrógeno podría evitar a las empresas grandes pérdidas financieras debido al desguace de una flota que funciona bien.

Otra área que hoy en día depende completamente de los combustibles fósiles es el área de los vehículos para ocio; en tierra, agua o aire. Dentro de este ámbito también sería de agradecer con una opción poder seguir utilizando estos vehículos. Lo mismo se aplica también a todos los tipos de motores relacionados con las carreras.

Otro aspecto es más emocional o nostálgico. Algunas personas encuentran difícil desguazar sus viejos motores de combustión y encuentran cierto encanto al escuchar su sonido.

Podría ser que uno deba considerar el desarrollo del combustible de hidrógeno para los motores Otto y diésel como una transición hasta que esos vehículos hayan llegado al punto en que necesiten ser reemplazados.

Esta sustitución de vehículos nuevos debería tenerse en cuenta al menos cuando hablamos de coches de uso comercial y privado.

Por otro lado, donde no haya posibilidades económicas, el combustible de hidrógeno podría ser una buena alternativa para poder seguir utilizando vehículos que hoy en día queman combustibles fósiles, gasolina o diésel.

8 REFERENCIAS

Autovista SE. (n.d.). Möjlighet till att tanka vätgas finns nu i 33 länder. [online] Disponible en: <https://autovista.se/news/eu/mojlighet-till-att-tanka-vatgas-finns-nu-i-33-lander/> [Accessed 19 Jan. 2023].

Billings, (2013). Hidrógeno: combustible del futuro | Dr. Roger Billings. [online] Disponible en: <https://www.rogerebillings.com/hydrogen/>.

Dimitriou, P. and Tsujimura, T. (2017). Un repaso del hidrógeno como combustible para motores de encendido por compresión. *Revista Internacional de Energía de Hidrógeno*, 42(38), pp.24470–24486. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.07.232.

Gültekin, N. and Ciniviz, M. (2022). Examen del efecto de la geometría de la cámara de combustión y la relación de mezcla en el rendimiento del motor y las emisiones en un motor de encendido por compresión de hidrógeno-diésel de combustible dual. *Revista Internacional de Energía del Hidrógeno*. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.10.155.

Kroyan, Wojciezyk, Kaario, Larmi. (2022). Modelado del rendimiento de uso final de las propiedades de los combustibles alternativos en vehículos de combustible flexible, *Conversión y gestión de energía*, 269, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116080>.

KSC, S.S. (n.d.). NASA - El diseño exigente impulsa el motor del transbordador. [online] www.nasa.gov. Available at: https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/flyout/ssme.html.

Kumar, A. R. (2016). Focus on Expansion of Hydrogen and Electric Fleets for Passenger and Freight Transport in United Kingdom (tesis doctoral, Facultad de Ciencias Físicas, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Aberdeen, King's College)

Museo Nacional de Historia Americana. (Dakota del Norte.). Tractor de pila de combustible Allis-Chalmers.[enlínea]Disponible en:
https://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah_687671.

Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables (2019). Producción de hidrógeno. [en línea] Energy.gov. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production>.

Rorimpandey, P., Lung Yip, H. Srna, A., Zhai, G., Wehrfritz, A., Kook, S., Hawkes, E.R., Chan, Q.N. (2023). Combustión de inyección directa de hidrógeno-diésel de combustible dual (H2DDI) en condiciones de motor de encendido por compresión, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2(48), pp 766-783, 0360-3199. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.241>.

SO-rummet. (2022). Luftskeppet Hindenburg. [online] Disponible en: <https://www.sorummet.se/kategorier/luftskeppet-hindenburg#> [Accessed 19 Jan. 2023].

Este día en la aviación, (2023). Ferdinand Adolf Heinrich Agosto Graf von Zeppelin | Este día en la aviación. [en línea] Disponible en: <https://www.thisdayinaviation.com/tag/ferdinand-adolf-heinrich-august-graf-von-zeppelin/> [Accessed 19 Jan. 2023].

Verhelst, S. and Wallner, T. (2009). Motores de combustión interna alimentados con hidrógeno. *Progreso en Ciencias de la Energía y la Combustión*, 35(6), pp.490–527. doi:10.1016/j.pecs.2009.08.001.

Wikipedia. (2019). De Rivaz engine. [online] Disponible en :
https://en.wikipedia.org/wiki/De_Rivaz_engine.

Yip, H.L., Srna, A., Yuen, A.C.Y., Kook, S., Taylor, R.A., Yeoh, G.H., Medwell, P.R. and Chan, Q.N. (2019). Una revisión de la inyección directa de hidrógeno para motores de combustión interna: hacia una combustión libre de carbono. *Ciencias Aplicadas*, 9(22), p.4842. doi:10.3390/app9224842.

9 REFERENCIAS DE IMÁGENES

Image 1: The De Rivaz Engine in detail,

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:De_Rivaz_IC_Engine_detail.jpg (Recuperada: 19-01-23)

Image 2: The De Rivaz Engine, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rivaz_Engine.jpg

(Recuperada: 19-01-23)

Image 3: The 1933 Norsk Hydro hydrogen truck,

<https://www.flickr.com/photos/hydrogencarsnow/8136698514/> (Recuperada: 19-01-23)

Image 4: Harry Karls Ihring fuel cell tractor, <https://www.rogerebillings.com/hydrogen/> (Recuperada: 19-01-23)

Image 5: Roger Billings hydrogen car, <https://www.science.edu/acellus/2018/07/first-hydrogen-car/> (Recuperada: 19-01-23)

Image 6: GM's fuel cell van, http://www.autoconcept-reviews.com/cars_reviews/gm/GM-hydrogen-fuel-cell-ELECTROVAN-and-battery-electric-ELECTROVAIR-1966/cars_reviews-GM-hydrogen-fuel-cell-ELECTROVAN-and-battery-electric-ELECTROVAIR-1966.html (Recuperada: 19-01-23)

Image 7: Showcase of hydrogen produced by solar energy,

https://www.researchgate.net/figure/Hydrogen-production-from-solar-energy-36_fig17_324719917

(Recuperada: 19-01-23)

Image 8: Keyou's hydrogen bus, <https://www.busandcoachbuyer.com/hydrogen-bus-prototype-unveiling-at-iaa/> (Recuperada: 19-01-23)

Image 9: Aircraft, <https://newatlas.com/energy/infinium-electrofuels-zero-carbon-fuel/>

(Recuperada: 19-01-23)

Image 10: Space shuttle, https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/flyout/ssme.html (Retrieved: 19-01-23)

Image 11: map showcasing hydrogen gas stations, <https://www.h2stations.org/press-release-2022-another-record-number-of-newly-opened-hydrogen-refuelling-stations-in-2021/> (Recuperada: 19-01-23)

Image 12: Hydrogen gas filling nozzle, <https://www.swagelok.com/en/blog/guofu-hydrogen-refueling-case-study> (Recuperada: 19-01-23)

Image 13: Honda's hydrogen filling station, <https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/home-hydrogen-fueling-stations/> (Recuperada: 19-01-23)

Image 14: Traffic in early 1900's, <https://blog.greenprojectmanagement.org/index.php/2019/05/13/pollution-why-we-replaced-horses-with-automobiles/> (Recuperada: 19-01-23)

Image 15: The Hindenburg airship accident, <https://www.history.com/news/the-hindenburg-disaster-9-surprising-facts> (Recuperada: 19-01-23)

Image 16: An Otto engine shown in a cut away drawing, <https://haynes.com/en-us/tips-tutorials/beginners-guide-what-four-stroke-engine> (Recuperada: 19-01-23)

Image 17: A Diesel engine shown in a cut away drawing, <https://www.hardwarezone.com.sg/feature-why-you-should-consider-diesel-your-next-car/diesel-vs-petrol-engines> (Recuperada: 19-01-23)

Image 18: Doosan's hydrogen tank, <https://www.doosanmobility.com/en/products/hydrogen-tank/> (Recuperada: 19-01-23)

Image 19: Fittings for hydrogen fuel lines, <https://www.nvfl.com/hydrogen-powered-fuel-cell-vehicles/> (Recuperada: 19-01-23)

Image 20: Ignited spark plug, <https://www.mycar.com.au/car-advice/spark-plugs-in-a-car> (Recuperada: 19-01-23)

Image 21: Drawing showing timing settings, <http://www.carnewscafe.com/2015/03/what-are-timing-marks/> (Recuperada: 19-01-23)

Image 22: Figure showcasing different injection methods, <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/22/4842>, s. 7 (Recuperada: 19-01-23)

Image 23: Private image of dual fuel injector from West port.

10 ABREVIACIONES

PMC	Punto Muerto Centro
BIO	Biológico
GNC	Gas Natural Comprimido
ID	Inyección Directa
RGE	Recirculation Gas Escape
HCCI	Encendido por compresión de carga homogénea HPDI
H ₂	Hydrógeno
MCI	Motor de Combustión Interna
GNL	Gas Natural Licuado