

**ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA
(UNIVERSIDAD DE CANTABRIA)**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA ACERCA DEL HIDRÓGENO (H₂) COMO FUTURO VECTOR ENERGÉTICO EN EL AUTOMÓVIL

(Study about the technique viability of the hydrogen (H₂) as an
energetic vector on the automotive for the future)



AUTOR: JORGE FERNÁNDEZ ARAUZO.

DIRECTOR: JUAN CARCEDO HAYA.

INGENIERÍA DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS.

FECHA: 30/06/2016.

ÍNDICE GENERAL:

1.-INTRODUCCIÓN.	6
1.1.-Objetivo.	6
1.2.-Antecedentes.	6
2.-ALCANCE DEL ESTUDIO.	10
3.-ESTADO DEL ARTE.	22
3.1.-Introducción.	22
3.2.-El molino de viento.	23
3.3.-Máquina térmica de Herón de Alejandría.	24
3.4.-Máquina de combustión interna mediante el uso de la pólvora como combustible.	25
3.5.-Primera máquina de vapor (Savery).	26
3.6.-Máquina de vapor de Newcomen.	26
3.7.-Regulador de Watt.	27
3.8.-Primeros intentos de elaboración de máquinas de combustión interna mediante el empleo de carbón como combustible.	28
3.9.-Aparición del Motor Stirling.	28
3.10.-Primeros indicios teóricos en base al motor de combustión interna.	31
3.11.-Máquina de combustión interna de Beau de Rochas.	31
3.12.-Motor de combustión interna de Lenoir.	32
3.13.-Inicios en el motor de cuatro tiempos Otto.	33
3.14.-Primeros desarrollos en motores de combustión interna.	34
3.15.-Primeros indicios sobre el motor Wankel o rotativo.	35
3.16.-Entrada del tetraetilo de plomo ((CH ₃ CH ₂) ₄ Pb) en el automovilismo.	37
3.17.-Primeros indicios de factores negativos frente a los combustibles fósiles.	39
3.18.-Aparición de las celdas de combustible.	41
3.19.-Primeras investigaciones y prototipos de celdas de combustible.	41
3.20.-Implementaciones e investigaciones más recientes.	45
3.21.-Motores de combustión interna convencionales.	55
3.22.-Combustibles empleados a día de hoy en los motores de combustión interna.	109
3.23.-Celdas de combustible.	132
3.24.-El hidrógeno (H ₂) como combustible del automóvil.	219

4.-DESCRIPCIÓN DE LA COMPARATIVA.	249
4.1.-Programas empleados. _____	249
4.2.-Cálculo de los elementos del vehículo de celda de hidrógeno (H ₂). _____	252
4.3.-Simulación mediante "Advisor Advanced Vehicle Simulator". _____	286
4.4.-Vehículo de combustión interna con ignición por chispa (Ciclo Otto). _____	298
4.5.-Vehículo de combustión interna de ignición por compresión (Ciclo Diesel). _____	301
4.7.-Vehículo híbrido eléctrico. _____	304
5.-RESULTADOS.	309
6.-CONCLUSIONES.	317
6.-ANEXOS.	317
7.1.-Modelado en 3D del vehículo de pila de combustible. _____	321
7.2.- Modelado en planta del vehículo de celda de combustible. _____	322
7.3.-Modelado 3D del mecanismo de funcionamiento del vehículo de pila de combustible. _____	323
7.4.- Modelado en planta del mecanismo de funcionamiento del vehículo de pila de combustible. _____	324
7.5.-Modelado de la pila de hidrógeno (H ₂) y de cada una de sus celdas (x250). _____	325
7.6.-Modelado 3D del sistema de almacenamiento energético de ión litio (Li) y de la CPU, del vehículo de pila de combustible. _____	326
7.7.-Modelado en 3D de la toma de oxidante (O ₂). _____	327
7.8.-Modelado de los depósitos de hidrógeno (H ₂) de alta presión en el vehículo de pila de combustible. _____	328
7.9.-Modelado del motor eléctrico de corriente alterna del vehículo de pila de combustible. _____	329
7.10.-Modelado de los dispositivos de inyección y conducción del hidrógeno (H ₂) en el vehículo de pila de combustible. _____	330
7.11.-Modelado de las ruedas con freno regenerativo del vehículo de celda de combustible. _____	331
7.12.-Esquema del funcionamiento del vehículo de pila de combustible modelado. _____	332
8.-BIBLIOGRAFÍA, ARTÍCULOS CIENTÍFICOS Y TRABAJOS CITADOS.	335
8.1.-Fuentes bibliográficas. _____	335
8.2.-Fuentes de trabajos científicos. _____	336
8.3.-Fuentes de artículos procedentes de revistas científicas. _____	337

8.4.-Software. _____ **338**

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

ÍNDICE:

<i>INTRODUCCIÓN:</i>	6
1.1.-Objetivo.	6
1.2.-Antecedentes.	6

INTRODUCCIÓN:

1.1.-Objetivo.

Este documento pretende describir la solución obtenida tras una investigación acerca de la viabilidad, o por el contrario, de su inviabilidad, en las tecnologías automovilísticas que basan su funcionamiento en el empleo del hidrogeno (H₂) como vector energético. Para alcanzar los objetivos planteados en el presente estudio, se abordará en la investigación sobre los mecanismos que utilizan a dicho elemento como base de su funcionamiento a día de hoy, encontrándose tanto a nivel de desarrollo como a nivel funcional. A su vez, se analizarán los motores de combustión interna de mayor empleo, los cuales basan su funcionamiento en el uso de los combustibles convencionales.

Se pretende así mismo, recabar información sobre diferentes investigaciones y estudios de índole científica, realizados por diversas organizaciones y grupos científico-tecnológicos, los cuales han basado sus resultados en metodologías y datos empíricos.

1.2.-Antecedentes.

La disminución progresiva de las reservas de combustibles fósiles y sus respectivos problemas de contaminación ambiental asociados a la combustión, han traído durante años, la atención de ciertos investigadores hacia la búsqueda de nuevos vectores energéticos alternativos dentro del abastecimiento energético. Dicha indagación, se ha encontrado abordando diversos campos de aplicación, entre los que ha destacado la automoción, debido al gran porcentaje de inconvenientes que conlleva el uso de combustibles fósiles, tanto a nivel económico, ambiental y sin olvidar los problemas de salud que derivan de los gases residuales tras dicha reacción.

El hidrógeno, es uno de estos posibles vectores ya que posee una gran cantidad de ventajas tanto ambientales como energéticas, debido a sus propiedades atómicas. Es un combustible limpio al reaccionar con aire en el proceso de combustión ya que da lugar a emisiones no contaminantes, excepto para algunas relaciones H₂/aire, en la cuales la llama adquiere una elevada temperatura dando lugar a concentraciones significantes de NO_x tras su combustión.

Además de su combustión directa, muy recientemente se ha comenzado a desarrollar una tecnología basada en pilas de combustibles en las cuales se transforma la energía química, la cual es almacenada en el enlace H-H de la molécula de H₂, en energía eléctrica y vapor de agua.

Para tener una idea de la magnitud del problema basta examinar el crecimiento experimentado por el parque automovilístico mundial. Así, mientras la población humana se ha duplicado desde las últimas décadas, el número de automóviles lo ha hecho por siete. En los países más desarrollados la velocidad de crecimiento del parque automovilístico se espera que se estabilice alrededor de un 1% por año, aunque la distancia promedia a recorrer aumenta con mayor velocidad, pudiendo llegar a alcanzar en ciertos países desarrollados, tales

como USA hasta un 4%. A ello, se debe añadir el crecimiento explosivo que está experimentando el tráfico rodado en algunos países. Por ejemplo, hasta el año 2020 en China este crecimiento se estima que aumente noventa veces con respecto al de 1990, mientras que en la India el crecimiento estimado en el mismo periodo sea de unas treinta y cinco veces. Como promedio, el parque automovilístico se duplicará en los próximos veinte años.

La cuestión inmediata que se plantea es el poder mitigar los efectos contaminantes resultantes del incremento progresivo del tráfico rodado. Las emisiones en los gases de escape de los motores, tales como hidrocarburos no quemados (HC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx), son las responsables de problemas de contaminación localizados. En los últimos años los constructores de automóviles han ido incorporando convertidores catalíticos postcombustión con el objetivo de reducir las emisiones contaminantes localizadas. Estos dispositivos catalíticos, denominados de tres vías, son muy eficientes en cuanto que eliminan 90-95% de las emisiones CO, NOx y HC.

La emisión más importante es el dióxido de carbono (CO₂), que actualmente ronda los 130g/km, pero que se espera reducir a medio plazo, debido a su implicación en el efecto invernadero global en la atmósfera, implicado en el cambio climático. La forma más simple de reducir dichas emisiones producidas por el tráfico rodado, consiste en aumentar la eficiencia de los motores desde sus niveles actuales de 35-45%, mediante la mejora de los diseños en los motores de combustión y en la estructura del propio vehículo. Además, como ya se ha mencionado, está surgiendo con fuerza una tecnología alternativa, basada en el motor eléctrico alimentado por una pila de combustible. Este concepto novedoso, ofrece ventajas sustanciales sobre la tecnología clásica de combustión, no solamente por el aumento de la eficiencia hasta niveles del 60%, sino también porque la única emisión producida es agua (H₂O).

La eficiencia intrínseca elevada de las pilas de combustible radica en que, como en un reactor electroquímico, produce esencialmente energía eléctrica al convertir el hidrógeno (H₂) y el oxígeno (O₂) en vapor de agua a baja temperatura, o en agua líquida. Por el contrario, en un motor de combustión interna, la mayor parte de la energía generada en la combustión se pierde en forma de calor, que se cede al ambiente, y una fracción muy pequeña de esa energía se convierte en energía mecánica útil. Además, la combustión de gasolina o diesel, produce una mezcla de compuestos gaseosos, que incluye hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono debido a una combustión incompleta y óxidos de nitrógeno.

Conscientemente del impacto de esta tecnología emergente en el sector de la automoción, algunos fabricantes de automóviles tales como Mercedes, Toyota, Volkswagen, Volvo o Audi entre otros, los cuales vienen concentrando esfuerzos desde 1996, con el objetivo de desarrollar automóviles eléctricos basados en pilas de combustible.

En los últimos años, compañías como Hyundai, Audi o Toyota entre otras, han presentado sus primeros modelos experimentales de automóviles eléctricos basados en una pila de hidrógeno (H₂).

El concepto de generar hidrógeno a bordo del propio automóvil durante la conducción parece la respuesta idónea al problema de disponer hidrógeno gaseoso de forma cómoda, económica y segura. Sin embargo, la elección del combustible generador de hidrógeno, aún se

encuentra sujeta al debate. Algunas compañías, han optado por el metanol. Ello se debe a que el metanol (CH_4O) es el tercer producto químico de partida, después del etileno (C_2C_4) y el amoníaco (NH_3), con una producción bastante superior a la demanda actual.

Otras compañías, consideran la propia gasolina o el Diesel como fuentes idóneas de hidrógeno. Así, Arthur D. Little ha construido recientemente una pila de combustible compacta, alimentada por el hidrogeno generado en el proceso de oxidación parcial de la gasolina con el aire. Varias tecnologías de procesado están diseñadas y basadas en la oxidación parcial y en el reformado de metanol (CH_4O) con vapor de agua. Por el contrario otras empresas, tratan de adquirir el hidrógeno a partir de disoluciones acuosas de sales metálicas concentradas. Una de estas posibles disoluciones, es el agua marina, debido a sus altas propiedades contenidas en las sales disueltas. Dicha tecnología, viene siendo investigada desde hace varios años por numerosas entes científicas, tales como la NASA, ya que dicha molécula de agua marina es una importante fuente de este elemento.

CAPÍTULO 2: ALCANCE DEL ESTUDIO

2.-ALCANCE DEL ESTUDIO:

El presente estudio, en su afán de plantear la discusión sobre los nuevos mecanismos y tecnologías a la hora de que el hidrógeno (H₂) juegue un importante papel en el ámbito automovilístico, se ha de realizar mediante un amplio análisis técnico y funcional de las diferentes tecnologías existentes. Por lo tanto, deben completarse los distintos campos de estudio, a nivel técnico y funcional, para así poder realizar la comparación, frente a las fuentes de abastecimiento de combustible ampliamente utilizadas en la actualidad. A continuación se describen las pautas a abarcadas por el informe.

- a) Desarrollo de las tecnologías del automóvil a lo largo de la historia: Para ello, en un primer lugar, se realizará un recorrido a lo largo de la historia, en el cual se tratará la evolución de los motores empleados en el automóvil, desde sus inicios hasta los denominados motores convencionales, es decir, los actualmente empleados en grandes masas.
- b) Análisis de los motores de combustión interna: A continuación, se profundizará en el estudio de los motores de combustión interna y en sus diferentes componentes, que trabajan con los combustibles más empleados hoy en día, los cuales presentan una serie de ventajas, pero a su vez otra serie de importantes inconvenientes.
- c) Estudio de los combustibles fósiles convencionales: En un tercer lugar, se han de estudiar los combustibles fósiles empleados en motores de combustión, junto con sus propiedades, tales como las gasolinas o el diesel fósil. A su vez, se continuará con esta misma operación, para el estudio de los diferentes tipos de biocombustibles y sus respectivas propiedades, los cuales poseen un alto porcentaje en el mercado actual, a nivel global.
- d) Obtención de los combustibles convencionales: Seguido, tras el estudio de los combustibles anteriores, se tratarán sobre sus diferentes métodos de producción a nivel industrial, abarcando sus ventajas y desventajas, entre ellos.
- e) Análisis del hidrógeno (H₂) como combustible: En un quinto paso, debido a que el estudio se centra en el hidrógeno (H₂) como uno de los posibles vectores energéticos para el futuro dentro del automóvil, se ha de analizar a esta sustancia desde el punto de vista de combustible, junto con sus métodos de producción y sus fuentes o medios de obtención.
- f) Estudio de las tecnologías automovilísticas que emplean hidrógeno (H₂) como combustible: Tras un análisis de dicho combustible, se procederá a tratar sobre los diferentes motores y mecanismos que trabajan a partir del hidrógeno (H₂) como combustible, ya sean mediante celdas de combustible u otras técnicas, como el empleo de esta sustancia en motores de combustión interna. Gran parte de estos

mecanismos, se encuentran en desarrollo a día de hoy, mientras que otros ya comienzan a tener su espacio a nivel comercial.

- g) Análisis comparativo entre las diferentes tecnologías estudiadas: Para posteriormente definir las conclusiones, se realizará un análisis comparativo de viabilidad, a nivel técnico, explicando las ventajas e inconvenientes de éstas nuevas tecnologías que emplean hidrógeno (H₂), frente a los motores convencionales. A su vez, se estudiarán las partes de estos novedosos mecanismos, en los cuales se ha de incrementar la investigación a nivel industrial, para así poder alcanzar su total viabilidad en las próximas décadas.
- h) Conclusiones: Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos tras la comparativa, se establecerán una serie de conclusiones, las cuales van a definir la viabilidad o por el contrario la inviabilidad de los vehículos propulsados por hidrógeno (H₂).

Con todo esto, se estará abriendo paso a futuras investigaciones, que podrán emplear la información y los resultados en busca de finalidades deseadas.

CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE

ÍNDICE:

3.-ESTADO DEL ARTE.	22
3.1.-Introducción.	22
3.2.-El molino de viento.	23
3.3.-Máquina térmica de Herón de Alejandría.	24
3.4.-Máquina de combustión interna mediante el uso de la pólvora como combustible.	25
3.5.-Primera máquina de vapor (Savery).	26
3.6.-Máquina de vapor de Newcomen.	26
3.7.-Regulador de Watt.	27
3.8.-Primeros intentos de elaboración de máquinas de combustión interna mediante el empleo de carbón como combustible.	28
3.9.-Aparición del Motor Stirling.	28
3.9.1-Descripción del ciclo Stirling.	29
3.10.-Primeros indicios teóricos en base al motor de combustión interna.	31
3.11.-Máquina de combustión interna de Beau de Rochas.	31
3.12.-Motor de combustión interna de Lenoir.	32
3.13.-Inicios en el motor de cuatro tiempos Otto.	33
3.14.-Primeros desarrollos en motores de combustión interna.	34
3.15.-Primeros indicios sobre el motor Wankel o rotativo.	35
3.16.-Entrada del tetraetilo de plomo ((CH ₃ CH ₂) ₄ Pb) en el automovilismo.	37
3.16.1.-Propiedades del tetraetilo de plomo ((CH ₃ CH ₂) ₄ Pb).	37
3.17.-Primeros indicios de factores negativos frente a los combustibles fósiles.	39
3.18.-Aparición de las celdas de combustible.	41
3.19.-Primeras investigaciones y prototipos de celdas de combustible.	41
3.19.1.-Celda de combustible de William Grove.	41
3.19.2.-Celda de combustible de Ludwing Mond y Carl Langer.	42
3.19.3.-Celda de combustible de William W. Jacques.	43
3.19.4.-Celdas de combustible de W. Nernst y de François Bacon.	44
3.19.5.-Celda de combustible de bromuro de estaño y el primer tractor impulsado por celdas alcalinas.	44
3.19.6.-Primeras aplicaciones en el Programa Espacial de los Estados Unidos.	44
3.19.7.-Primera celda de combustible aplicada al automovilismo.	45

3.20.-Implementaciones e investigaciones más recientes.	45
3.20.1.-Primeras redes de transporte público urbano de celda de combustible.	46
3.20.2.-Relaciones gubernamentales con respecto a la industria de las pilas de combustible.	46
3.20.3.-Celdas de combustibles aplicadas en el automovilismo más reciente.	47
3.20.3.1.-Toyota Mirai.	48
3.20.3.2.-Audi h-tron quattro concept.	49
3.20.3.3.-Quant e-Sport limousine.	51
3.20.3.4.-Quant-FE.	53
3.20.3.5.-Quantino.	54
3.21.-Motores de combustión interna convencionales.	55
3.21.1.-Introducción.	55
3.21.2.-Motor de combustión interna a volumen constante, ciclo Otto.	56
3.21.3.-Motor de combustión interna de combustión a presión constante, ciclo Diesel.	57
3.21.4.-Similitudes y diferencias entre el ciclo Otto y el Ciclo Diesel.	59
3.21.5.-Elementos que componen a los motores de combustión interna y sus características.	60
3.21.5.1.-Sistema de bloques de entradas y salidas.	60
3.21.5.2.-Sistema de lubricación.	61
3.21.5.2.1.-Funcionamiento del sistema de lubricación.	62
3.21.5.2.2.-Principales fallos en un sistema de lubricación.	62
3.21.5.2.3.-Mantenimiento sobre un sistema de lubricación.	63
3.21.5.3.-Sistema de escape en un motor de combustión interna.	63
3.21.5.3.1.-Funcionamiento de los sistemas de escape.	63
3.21.5.3.2.-Principales fallos en un sistema de escape.	64
3.21.5.3.3.-Mantenimiento sobre el sistema de escape.	64
3.21.5.4.-Sistema mecánico de regulación de velocidad.	64
3.21.5.4.1.-Funcionamiento del sistema mecánico de regulación de velocidad.	65
3.21.5.4.2.-Principales problemas de un sistema mecánico de regulación de velocidad.	65
3.21.5.4.3.-Mantenimiento sobre un sistema de regulación mecánica de velocidad.	66

3.21.5.5.-Sistema de biela y manivela en un motor de combustión interna.	66
3.21.5.5.1.-Funcionamiento del sistema biela-manivela.	67
3.21.5.5.2.-Comunes fallos en un sistema de biela-manivela.	68
3.21.5.5.3.-Mantenimiento y seguridad ante un sistema de biela-manivela.	68
3.21.5.6.-Carburadores.	68
3.21.5.6.1.-Carburadores para combustibles líquidos.	68
3.21.5.6.1.1.-Funcionamiento de un carburador de combustibles líquidos.	69
3.21.5.6.1.2.-Fallos comunes en carburadores para combustibles líquidos.	70
3.21.5.6.1.3.-Seguridad y mantenimiento de carburadores para líquidos.	70
3.21.5.6.2.-Carburador para combustibles gaseosos.	70
3.21.5.6.2.1.-Funcionamiento de carburadores para combustibles gaseosos.	70
3.21.5.6.2.2.-Fallos que tiene lugar en un carburador para gases.	71
3.21.5.6.2.3.-Seguridad y mantenimiento en carburadores para gases.	71
3.21.5.7.-Alimentador de combustibles gaseosos.	72
3.21.5.7.1.-Elementos que intervienen en la alimentación de combustibles gaseosos.	72
3.21.5.7.2.-Seguridad y mantenimiento ante posibles fallos en un sistema de alimentación de combustible gaseoso.	74
3.21.5.8.-Alimentador de combustible líquido en motores de combustión interna.	74
3.21.5.8.1.-Funcionamiento de un sistema de alimentación de combustibles líquidos para un motor de combustión interna.	75
3.21.5.8.2.-Seguridad y mantenimiento en un sistema de alimentación de combustibles en estado líquido.	76
3.21.5.9.-Alimentación de aire comburente, en un motor de combustión interna.	76
3.21.5.9.1.-Elementos que intervienen en un sistema de alimentación del comburente.	76
3.21.5.9.2.-Control y mantenimiento en un sistema de alimentación del comburente.	77
3.21.5.10.-Sistema mecánico de inyección de combustible en los motores de combustión interna de ignición por compresión.	77
3.21.5.10.1.-Funcionamiento de un sistema mecánico de inyección de combustible en los motores Diesel.	78

3.21.5.10.2.-Principales fallos generados en un sistema mecánico de inyección de combustible en los motores Diesel.	79
3.21.5.10.3.-Mantenimiento y seguridad en un sistema mecánico de inyección de combustible en los motores de combustión interna de ignición por compresión.	79
3.21.5.11.-Sistema de encendido en motores de combustión interna de encendido por chispa.	80
3.21.5.11.1.-Funcionamiento de un sistema de encendido en motores de combustión interna.	81
3.21.5.11.2.-Fallos más frecuentes en un sistema de encendido para motores de combustión interna.	82
3.21.5.11.3.-Seguridad y mantenimiento en un sistema de encendido de un motor de combustión interna.	82
3.21.5.12.-Sistema de encendido por magneto.	82
3.21.5.12.1.-Funcionamiento de un sistema de encendido por magneto.	83
3.21.5.12.2.-Fallos más comunes en un sistema de encendido por magneto.	84
3.21.5.12.3.-Seguridad y mantenimiento en un sistema de encendido por magneto.	85
3.21.5.13.-Sistema de refrigeración.	85
3.21.5.13.1.-Funcionamiento de un sistema de refrigeración.	86
3.21.5.13.2.-Principales fallos en un sistema de refrigeración.	87
3.21.5.13.3.-Seguridad y mantenimiento en un sistema de refrigeración.	87
3.21.5.13.4.-Fluidos refrigerantes convencionales.	88
3.21.5.14.-Transmisión de la potencia, tomas de fuerza.	88
3.21.5.14.1.-Funcionamiento del mecanismo de transmisión de potencia.	88
3.21.5.14.2.-Principales fallos en un mecanismo de transmisión de potencia.	89
3.21.5.14.3.-Seguridad y mantenimiento de un mecanismo de transmisión de potencia.	89
3.21.5.15.-Sistema de inyección electrónica de combustible.	90
3.21.5.15.1.-Funcionamiento de un sistema de inyección electrónica de combustible.	91
3.21.5.15.2.-Seguridad y mantenimiento de un sistema de inyección electrónica de combustible, ante sus principales fallos.	92
3.21.5.16.-Torque y potencia, medición de la potencia en un motor de combustión interna.	92

3.21.6.-El motor rotativo o Wankel, una variante dentro de los motores de combustión interna.	95
3.21.6.1.-Estructura y funcionamiento de un motor rotativo.	95
3.21.6.2.-Características del motor rotativo.	98
3.21.6.3.-Desventajas e inconvenientes de los motores rotativos.	100
3.21.6.4.-Aceites empleados en esta clase de motores rotativos.	100
3.21.6.5.-Comparación entre un motor rotativo y un motor de cilindros.	101
3.21.6.6.-Funcionamiento de un motor rotativo con hidrógeno (H ₂) como combustible.	103
3.21.7.-Vehículos híbridos.	104
3.21.7.1.-Componentes de un vehículo híbrido.	105
3.21.7.2.-Propiedades de los vehículos híbridos frente a los convencionales.	106
3.21.7.3.-Clasificación de los vehículos híbridos.	106
3.22.-Combustibles empleados a día de hoy en los motores de combustión interna.	109
3.22.1.-Número de Octano, poder antidetonante de los combustibles.	109
3.22.2.-Número de Cetano, facilidad de ignición.	110
3.22.3.-Combustibles líquidos y gaseosos.	112
3.22.4.-Principales combustibles convencionales.	113
3.22.4.1.-Gasolina.	113
3.22.4.1.1.-Obtención de la gasolina.	116
3.22.4.2.-Gasóleo.	118
3.22.4.2.1.-Obtención del gasóleo.	120
3.22.4.3.-Gas natural comprimido como alternativa frente a los combustibles convencionales.	121
3.22.4.3.1.-Obtención del gas natural.	123
3.22.4.4.-Gases licuados del petróleo (GLP) como alternativa frente a los combustibles convencionales.	124
3.22.4.4.1.-Obtención de los gases licuados del petróleo (GLP).	126
3.22.4.5.-El biodiesel como alternativa frente a los combustibles convencionales.	127
3.22.4.5.1.-Obtención del biodiesel.	129
3.23.-Celdas de combustible.	132
3.23.1.-Introducción.	132
3.23.2.-Clases de celdas de combustible.	134

3.23.2.1.-Celdas de combustible alcalinas (AFC).	134
3.23.2.1.1.-Reacción que tiene lugar en las celdas AFC.	135
3.23.2.1.2.-Electrolitos empleados en las celdas AFC.	135
3.23.2.1.3.-Variantes en las celdas AFC.	136
3.23.2.2.-Celdas de combustible de metanol directo (DMFC).	137
3.23.2.2.1.-Metanol empleado en las celdas DMFC (CH ₃ OH).	138
3.23.2.2.2.-Reacción producida en las DMFC.	138
3.23.2.3.-Celdas de combustible de etanol directo (DEFC).	139
3.23.2.3.1.-Etanol empleado en las celdas DEFC (C ₂ H ₅ OH).	140
3.23.2.4.-Celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC).	140
3.23.2.5.-Celdas de combustible de Carbonatos fundidos (MCFC).	141
3.23.2.6.-Celdas de combustible de óxidos sólidos (SOFC).	142
3.23.2.7.-Celdas de combustible poliméricas (PEMFC).	143
3.23.2.7.1.-Elementos que componen una celda de combustible polimérica (PEMFC).	145
3.23.2.7.1.1.-Electrodos.	146
3.23.2.7.1.2.-Placas difusoras.	148
3.23.2.7.1.3.-Placas bipolares.	149
3.23.2.7.1.4.-Colectores de corriente.	150
3.23.2.7.1.5.-Placas terminales.	151
3.23.2.7.1.6.-Sellos y juntas.	152
3.23.2.7.1.7.-El electrolito.	152
3.23.2.7.1.7.1.-El Nafion como principal componente de las celdas de combustible poliméricas.	153
3.23.2.7.1.7.2.-Membrana de quitosán para celdas de combustible poliméricas.	154
3.23.2.7.1.7.3.-Membrana grafeno defectuoso en pilas de combustible poliméricas.	156
3.23.2.7.1.8.-Sistema compuesto por la membrana y el electrodo (MEA).	157
3.23.2.7.2.-Reacciones en una celda de combustible polimérica (PEMFC).	158
3.23.2.7.3.-Proceso ideal en el interior de una celda de combustible polimérica (PEMFC).	159

3.23.2.7.4.-Proceso real en el interior de una celda de combustible polimérica (PEMFC).	162
3.23.2.7.5.-El Stack, la unión entre varias celdas de combustible.	165
3.23.2.7.5.1.-Las placas bipolares.	166
3.23.2.7.5.2.-Las placas de cierre.	167
3.23.2.7.5.3.-Las placas refrigeradoras.	168
3.23.2.7.5.4.-Parámetros y dimensionamiento de un Stack de pilas de combustible.	168
3.23.3.-Funcionamiento de un vehículo mediante el empleo de hidrógeno (H ₂).	173
3.23.4.-Vehículos que basan su funcionamiento en pilas de combustible.	173
3.23.4.1.-Componentes de un vehículo que basa su funcionamiento en una pila de hidrógeno.	174
3.23.4.1.1.-Motores eléctricos.	174
3.23.4.1.1.1.-Motor eléctrico en cada rueda.	176
3.23.4.1.2.-Pila de combustible.	176
3.23.4.1.3.-Depósitos de almacenamiento de hidrógeno (H ₂).	177
3.23.4.1.3.1.-Depósitos de alta presión.	178
3.23.4.1.3.2.-Depósitos de almacenamiento criogénico.	180
3.23.4.1.3.3.-Depósitos de absorción en aleaciones.	180
3.23.4.1.3.4.-Tanques de almacenamiento de hidrógeno (H ₂) en estado sólido.	181
3.23.4.1.4.-Sistema de almacenamiento energético o baterías.	182
3.23.4.1.4.1.-Baterías de ion litio (Li).	183
3.23.4.1.4.2.-Baterías de plomo (Pb) ácido.	185
3.23.4.1.4.3.-Baterías de Metal Níquel (Ni).	188
3.23.4.1.4.4.-Baterías de Litio (Li) y aire.	190
3.23.4.1.4.5.-Baterías de aluminio (Al) y aire.	191
3.23.4.1.4.6.-Baterías de sodio (Na) aire.	192
3.23.4.1.4.7.-Baterías de Zinc (Zn) y aire.	193
3.23.4.1.4.8.-Baterías de sacarosa (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁).	194
3.23.4.1.4.9.-Baterías de polímeros de grafeno.	195
3.23.4.1.4.9.1.-El grafeno.	196
3.23.4.1.5.-Unidad electrónica de control.	197

3.23.4.1.6.-Sistema de conductos para gases. _____	198
3.23.4.1.7.-Sistema de frenado regenerativo. _____	199
3.23.5.-Vehículos que basan su funcionamiento en motores de combustión interna, empleando hidrógeno (H ₂) como combustible. _____	200
3.23.5.1.-Elementos que lo componen. _____	201
3.23.5.1.1.-Mecanismo de ignición. _____	201
3.23.5.1.2.-Control sobre el aceite del motor. _____	202
3.23.5.1.3.-Sistema de culata y refrigeración. _____	203
3.23.5.1.4.-Estructura del motor. _____	203
3.23.5.1.5.-Mecanismo de suministro del combustible. _____	204
3.23.5.1.6.-Ventilación sobre el cárter del motor. _____	206
3.23.5.1.7.-Sistema de escape. _____	206
3.23.5.1.8.-Aceite lubricante. _____	207
3.23.5.2.-Reacciones ocurridas dentro de un motor de combustión interna basando su funcionamiento en el empleo de hidrógeno (H ₂) como combustible. _____	207
3.23.5.3.-Propiedades de esta clase de motores. _____	209
3.23.6.-Vehículos que basan su funcionamiento en el uso de pilas de flujo electrolítico. _____	211
3.23.6.1.-Celdas de flujo electrolítico (Redox) convencionales. _____	213
3.23.6.2.-Celda de flujo electrolítico nanoFlowCell. _____	213
3.23.6.3.-Ventajas de emplear celdas de flujo electrolítico. _____	217
3.23.6.4.-Repostaje del flujo electrolítico. _____	218
3.23.6.5.-Comportamiento de las celdas de flujo electrolítico ante el medio ambiente. _____	218
3.24.-El hidrógeno (H ₂) como combustible del automóvil. _____	219
3.24.1.-El átomo de hidrógeno (H). _____	219
3.24.2.-Propiedades del hidrógeno (H ₂). _____	221
3.24.3.-Métodos de producción del hidrógeno (H ₂). _____	225
3.24.3.1.-Obtención del hidrógeno (H ₂) a partir del reformado metano (CH ₄) o del gas natural. _____	226
3.24.3.2.-Obtención del hidrógeno (H ₂) a partir del metanol (CH ₄ O). _____	227
3.24.3.3.-Obtención del hidrógeno (H ₂) mediante procesos térmicos. _____	231
3.24.3.5.-Obtención del hidrógeno (H ₂) a partir de la electrólisis convencional. _____	233

3.24.3.6.-Obtención de hidrógeno (H ₂), mediante electrólisis en fase de vapor. __	234
3.24.3.7.-Obtención del hidrógeno (H ₂) mediante electrólisis, empleando un catalizador biodegradable basado en enzimas. _____	235
3.24.3.8.-Obtención de hidrógeno (H ₂) a partir de la electrólisis de la urea (CON ₂ H ₄). _____	236
3.24.3.9.-Obtención del hidrógeno (H ₂), a partir de la biomasa. _____	237
3.24.3.10.-Obtención del hidrógeno (H ₂) a partir de sistemas biológicos. _____	238
3.24.3.11.-Producción del hidrógeno (H ₂) a partir de la energía solar. _____	240
3.24.3.12.-Obtención del hidrógeno (H ₂) a través de residuos plásticos. _____	241
3.24.3.13.-Obtención del hidrógeno (H ₂) a partir de la energía eólica. _____	242
3.24.4.-El transporte del hidrógeno (H ₂). _____	244
3.24.5.-Estaciones de suministro del hidrógeno (H ₂). _____	245

3.-ESTADO DEL ARTE.

3.1.-Introducción.

Para comenzar a tratar sobre la posible viabilidad, acerca del funcionamiento de las tecnologías que emplean hidrógeno como combustible, se debe abordar antes un análisis sobre el desarrollo de los diferentes motores y mecanismos que han sido desarrollados y comercializados a lo largo de la historia, en el ámbito automovilístico.

En un primer lugar, se ha de definir de forma genérica o global, el significado de motor de combustión interna, ya que se trata de la tecnología más empleada en el automóvil a día de hoy.

- También conocido como motor a explosión o motor a pistón, consiste en un tipo de mecanismo capaz de obtener energía mecánica a través de la energía química contenida en un combustible, el cual reacciona con un comburente, dentro de la cámara de combustión. Su nombre se debe a que dicha reacción es producida dentro de la propia máquina, a diferencia de otros mecanismos como puede ser la máquina de vapor.

Desde un punto de vista cronológico de la técnica y tecnología de los motores y de eventos que influyeron en la evolución de los mismos, se desarrolla la siguiente clasificación cronológica, realizada por medio de la observación de los trabajos realizados por científicos, empíricos e ingenieros, cuyos valores técnico y conceptual motivaron a otras personas para la búsqueda de un mejor desarrollo en este campo de ingeniería.

Uno de los retos más importantes en la ingeniería es y ha sido la transformación de fuentes energéticas, que de manera tan pródiga nos ofrece la naturaleza, en aquellas formas que sean más fácilmente aprovechables para el hombre.

Desgraciadamente, la naturaleza suministra la energía en forma que se requiere de una serie de transformaciones básicas antes de poder contar con la energía disponible que habrá de brindar la posibilidad de efectuar un trabajo.

De esta manera, el hombre se ve forzado a utilizar y aprovechar la enorme reserva natural contenida en algunas sustancias como energías química o nuclear, las que pueden ser transformadas directamente en energía térmica. Este calor es aprovechado por algún mecanismo que participa en la transformación energética, que por medio de elementos de transmisión, lo convierte en trabajo; esos dispositivos son las máquinas térmicas.

A pesar del alto grado de complejidad y de la gran variedad de las máquinas existentes hoy en día, sus principios elementales tienen aún como base los mismos de las máquinas fundamentales; esto es, la palanca la rueda, el eje, la polea, la cuña y el tornillo. Estas seis máquinas elementales, las cuales fueron inventadas miles de años atrás, se repiten como componentes de las máquinas contemporáneas una y otra vez, pudiéndose asegurar que, en su parte mecánica, las máquinas modernas son básicamente la yuxtaposición repetida y congruente de estos seis mecanismos mencionados.

Ahora bien, el camino hacia la máquina más compleja hubo de pasar por otras conquistas no menos importantes en la historia del conocimiento científico, como fueron el dominio mental y su modelo, hecho que se dio hacia el año 500 antes de Cristo, en India, China y el Imperio Romano, cuando empezó a producirse el acero de una manera empírica (1).

Ese avance tecnológico en la historia trajo consigo el descubrimiento y la aplicación de los propulsores primarios: la rueda hidráulica en un primer lugar, para un siglo más tarde poder traer el molino de viento, que fueron las primeras máquinas complejas con las cuales el hombre comenzó a producir trabajo mecánico a gran escala y ejemplificó los primeros intentos para un aprovechamiento racional de la energía que nos proporciona el medio natural.

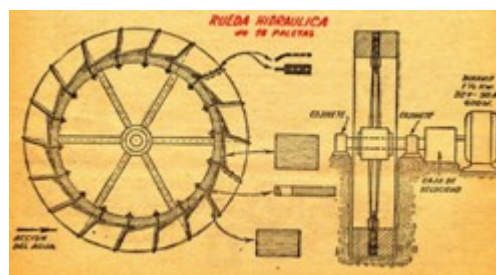


Figura 1: Alzado y perfil de una rueda hidráulica de 18 álabes.

Fuente: www.st31sistemahidraulico.blogspot.com

3.2.-El molino de viento.

El molino de viento fue conocido en Europa a partir del siglo XII. Estos molinos, conocidos como molinos poste, eran casetas de dos aguas apoyadas sobre un poste central de madera, cuyo cuerpo estaba provisto de aspas que encaraban al viento a la hora de girar. Los molinos de poste se difundieron rápidamente, debido a la escasez de mano de obra y a las necesidades de producción en aquel momento, especialmente en la trituración de granos, aserrar madera, cardar lana, preparar la seda y trabajos de minería entre otras aplicaciones. Los molinos de poste evolucionaron primero hacia los llamados de torre, que poseían una forma cilíndrica y fabricados de piedra o ladrillo, con el techo cónico giratorio. Ya en el siglo XIX, tienen lugar los diseñados por el ingeniero Halland Standard, con aspas metálicas y un timón que poseía la función de encarar automáticamente las aspas al viento (2).

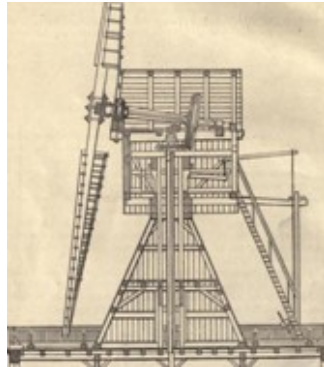


Figura 2: Mecanismos de un molino de viento.

Fuente: www.es.lowtechmagazine.com

Los impulsores mecánicos y las principales fuentes de energía alternativa fueron complementados durante la edad media, lográndose la fabricación de molinos tanto para producir harina, en minerales, sierras y filtros rústicos para la fabricación de papel, entre otros. Su eficiencia no era del todo eficaz, pero surgieron como la base a mejorar y adquirir la tecnología que hoy en día se domina.

Es sorprendente que, aunque ya se generaba energía mecánica a partir de las corrientes tales como el aire y el agua, como era lógico debido a su simpleza, se produjera energía mecánica partiendo de los combustibles fósiles sin tener unas bases sólidas en el estudio de la termodinámica, en las cuales se profundizó a partir del siglo XIX. (1)

3.3.-Máquina térmica de Herón de Alejandría.

Así, Herón de Alejandría fabricó hacia el siglo I antes de Cristo la primera máquina térmica, la cual consistía en una vasija de cobre llena de agua que al ser calentada liberaba vapor, el cual pasaba por un tubo hasta un globo hueco y salía a través de dos tubos dispuestos tangencialmente a éste, produciendo la rotación del mismo ante la sorpresa de los presentes. Esta fue una concepción adecuada para el principio motor de la turbina de vapor.

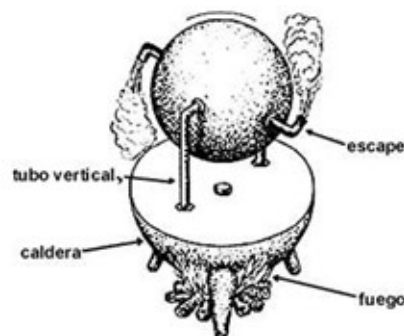


Figura 3: Máquina de Herón de Alejandría.

Fuente: www.circuit-racebars.blogspot.com

A pesar de la aparente simplicidad para el desarrollo de las turbo máquinas, no sorprende que hayan sido las máquinas de émbolo las que se construyeron primero sin el conocimiento de las leyes de la termodinámica. Esto, es debido a que las primeras requerían mayor base científica que la existente en aquel entonces. Por ejemplo, se dieron inventos como el de Giovanni de Branca (siglo XVII) quien trató de mover una rueda de paletas con un chorro de vapor procedente de una marmita, y el de Blasco de Garay (siglo XVI), marino español, quien quiso impulsar una embarcación con un eolipila de gran tamaño, ambos con resultados negativos. (2)

3.4.-Máquina de combustión interna mediante el uso de la pólvora como combustible.

El advertimiento de nuevos inventos durante la Edad Media, trae consigo el conocimiento del vapor, de sus propiedades de expansión y del vacío que produce al condensarse en un recipiente cerrado. Lo que lleva al ser humano al desarrollo práctico de las primeras máquinas térmicas, construidas con fines de trabajo y generación de energía.

La teoría del vapor había sido ya tratada por Galileo Galilei, Torricelli, Morland y Gauss, entre otros, durante el siglo XVII. (2) Por ejemplo, existen numerosos documentos que indican que, hacia 1685, el físico Holandés Jan Christian Huyghens (1639-1695) y su acompañante francés, Denis Papín trataron de construir una máquina de combustión interna usando pólvora como combustible. Su invención incluía el mecanismo de pistón y cilindro, y además un elemento de suma utilidad como pudo ser la válvula de seguridad. (2) Este invento duró casi un siglo y puede decirse que se constituyó en el primer intento de máquina térmica de combustión interna, pero lamentablemente la dificultad asociada con la renovación de la carga después de cada explosión y la falta de continuidad en el trabajo mecánico que se obtenía de ésta máquina, hicieron que los esfuerzos se centraran más en el vapor como fluido de trabajo.

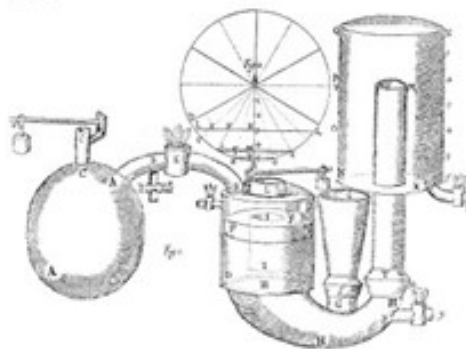


Figura 4: Máquina de combustión interna mediante el uso de la pólvora como combustible, de Jan Christian Huyghens y Denis Papín.

Fuente: www.larouchepub.com

3.5.-Primera máquina de vapor (Savery).

El curso de la historia, obliga a realizar un recorrido cronológico, que a efectos del objeto de este estudio, será breve, con el vapor como motor del desarrollo humano, antes de entrar en la era de los motores de combustión interna. Fue el inglés Thomas Savery quien a finales del siglo XVII, construyó la primera máquina de vapor, patentada en 1698. La máquina de Savery consistía en una bomba de succión provista de un cilindro, destinada a drenar las aguas de las minas de carbón. En realidad, ésta era una máquina muy simple, ya que constaba de un tanque cerrado, que al ser llenado de vapor y condensado, por medio de agua (H₂O), daba lugar a un vacío, mediante el cual el fluido procedente de las minas era succionado a un segundo tanque, para luego ser vaciado. (1)



Figura 5: La máquina de Savery.

Fuente: www.thinglink.com

La limitación fundamental de esta máquina era la propia presión atmosférica, la cual era su límite máximo de acción, con un valor de 10 metros de columna de agua aproximadamente.

Pocos años más tarde, en 1705, el herrero Thomas Newcomen orientó sus trabajos de perfeccionamiento hacia un tipo de máquina nueva más versátil, la llamada máquina de balancín. (1)

3.6.-Máquina de vapor de Newcomen.

En la máquina de vapor de Newcomen, el vapor, generado en una caldera situada bajo el cilindro de potencia, se introducía en éste, elevando el pistón hasta su máxima altura vertical. En este momento, se provocaba la condensación del vapor mediante una inyección de agua fría en el interior del cilindro, de modo que por la acción de la presión atmosférica

aplicada en la otra cara del pistón, por lo que de ahí proviene el nombre de motor atmosférico, realizando la carrera descendente de trabajo.

Las características de desempeño de esta máquina eran aproximadamente las siguientes (2):

- 16 carreras por minuto.
- 6 caballos de vapor de potencia (4416W).
- Rendimiento térmico aproximadamente igual al 0,5%, que posteriormente con las mejoras introducidas por Smeaton, ascendió hasta el 1%.

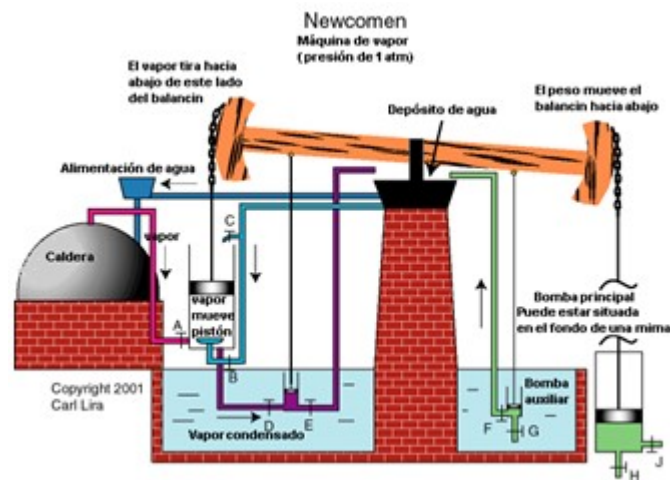


Figura 6: Máquina de vapor de Newcomen.

Fuente: www.teleformacion.edu.aytolacoruna.es

Con las bases teóricas de Papín y las aportaciones prácticas de Saverey y Newcomen, el ingeniero y mecánico escocés James Watt, entre 1769 y 1800, realizó grandes modificaciones que redundaron en las mejores prestaciones de su máquina. Sus innovaciones consistieron en aprovechar el doble efecto de la presión del vapor, instalando a cada lado del cilindro una cámara de condensación y un comportamiento. En éste, se realizaba el vacío provocado por la subida del pistón. (2) Entre las grandes aportaciones que hizo Watt al desarrollo de la ingeniería, se encuentra la implementación de dispositivos de medición y la innovación de sistemas de control, destacando el Regulador de Watt.

3.7.-Regulador de Watt.

El Regulador de Watt adoptó en 1787, bien llamado "gobernador", y la aplicación de este diseño a la máquina de vapor, revisten una gran importancia en la historia de la técnica, ya que este hecho fue el que posibilitó la aparición de una numerosa gama de aparatos de control automático.

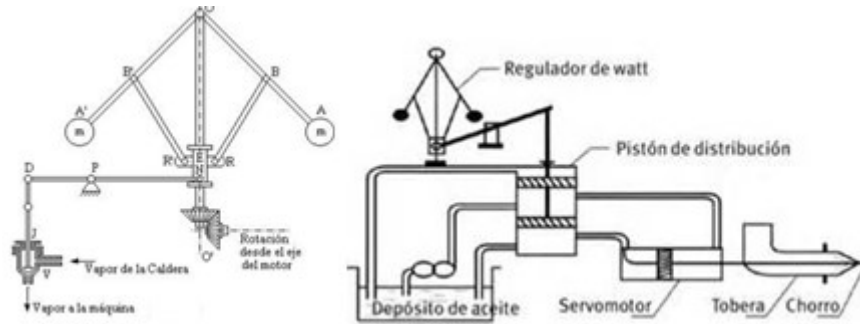


Figura 7: Regulador de Watt.

Fuente: www.elprofetiraondas.wordpress.com

3.8.-Primeros intentos de elaboración de máquinas de combustión interna mediante el empleo de carbón como combustible.

Los filósofos naturales del siglo XVIII, tenían una curiosidad y una creatividad tan grande que los llevaron a experimentar con un nuevo proyecto de motor de combustión interna, aunque el único combustible conocido, disponible y barato en su época, era el carbón.

Otros intentos, ya no con el vapor como fluido de trabajo, se registraron en Inglaterra hacia 1794, cuando el mecánico Robert Street intentó construir un motor de explosión que funcionaba con hulla, pero el proyecto finalizó sin éxito. Cinco años más tarde, en Francia, el ingeniero Philippe Lebon, volvió a tratar de hacer un motor de combustión interna, con un fracaso análogo al de sus predecesores.

La llegada del siglo XIX, trajo consigo los primeros inventos del hombre en el terreno del transporte, teniendo como base la máquina del vapor desarrollada por Richard Thravenick en el año 1804, luego Thimoty Hackworth y William Hedley construyen una mejor versión y dan pie para la invención del buque de vapor por Robert Fulton, en 1807. (2)

3.9.-Aparición del Motor Stirling.

Aunque se tuvo gran éxito con la máquina de vapor, también existieron alternativas diferentes para el empleo del vapor como fluido de trabajo, usando parámetros similares. Esto dio lugar al desarrollo de los llamados motores de aire caliente. Fue así como el motor Stirling, el cual fue inventado por sir Robert Stirling, fraile escocés, hacia el año 1816, en sus inicios compitió efectivamente con el motor de vapor, pero perdió interés después del desarrollo del motor de combustión interna, hacia finales del siglo XIX. (1)

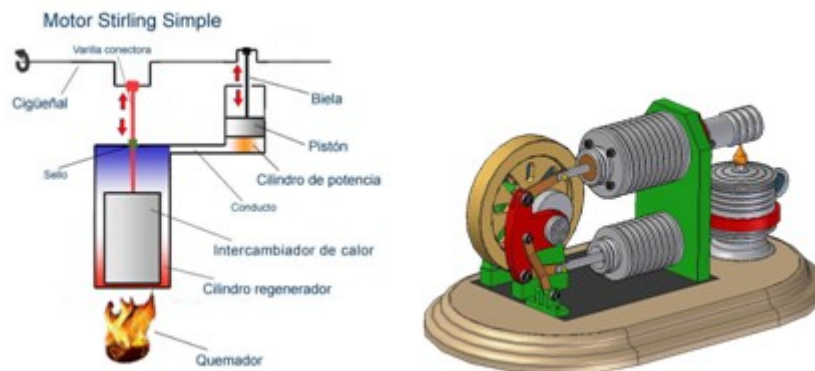


Figura 8: Esquema de funcionamiento de un motor Stirling simple.

Figura 9: Representación de un motor Stirling en Auto CAD.

Fuentes: www.todomotores.cl y www.grabcad.com

Este motor está retomando importancia en los últimos años, debido a sus altas y favorables características que posee, en particular:

- **Rendimiento:** El motor Stirling posee el potencial de alcanzar el rendimiento de Carnot, lo cual le permite, teóricamente, alcanzar el límite máximo de rendimiento.
- **Fuente de calor externa:** Este motor intercambia el calor con el exterior, por tanto se adapta a una gran gama de fuentes de calor para su operación. Se han construido motores Stirling que usan como fuente de calor la energía nuclear, la energía solar, los combustibles fósiles, el calor de desecho de procesos, entre otros. Al ser de combustión externa, el proceso de combustión se puede controlar muy bien, por lo cual se reduce así las emisiones.
- **Ciclo cerrado:** El fluido de trabajo opera en un ciclo cerrado y la fuente de calor es externa. Esto hace que el motor tenga un nivel de emisiones potencialmente bajo.

Como contrapartida a esas características favorables, está el hecho de que el fluido de trabajo es gaseoso, lo cual acarrea dificultades operativas; en la práctica, se ha visto que los fluidos de trabajo viables son el hidrógeno y el helio; ambos por sus favorables propiedades termodinámicas. (3)

3.9.1-Descripción del ciclo Stirling.

Dicho ciclo teórico, está compuesto por dos evoluciones a volumen constante y dos evoluciones isotérmicas, a una T_c (temperatura del fluido de trabajo en el volumen mínimo) y la segunda T_f (temperatura del fluido de trabajo en el volumen máximo). El fluido de trabajo se supone que es un gas perfecto. En el ciclo teórico hay un aspecto importante, que es la existencia de un regenerador, el cual posee la propiedad de poder absorber y ceder calor en las evoluciones a volumen constante en el ciclo.

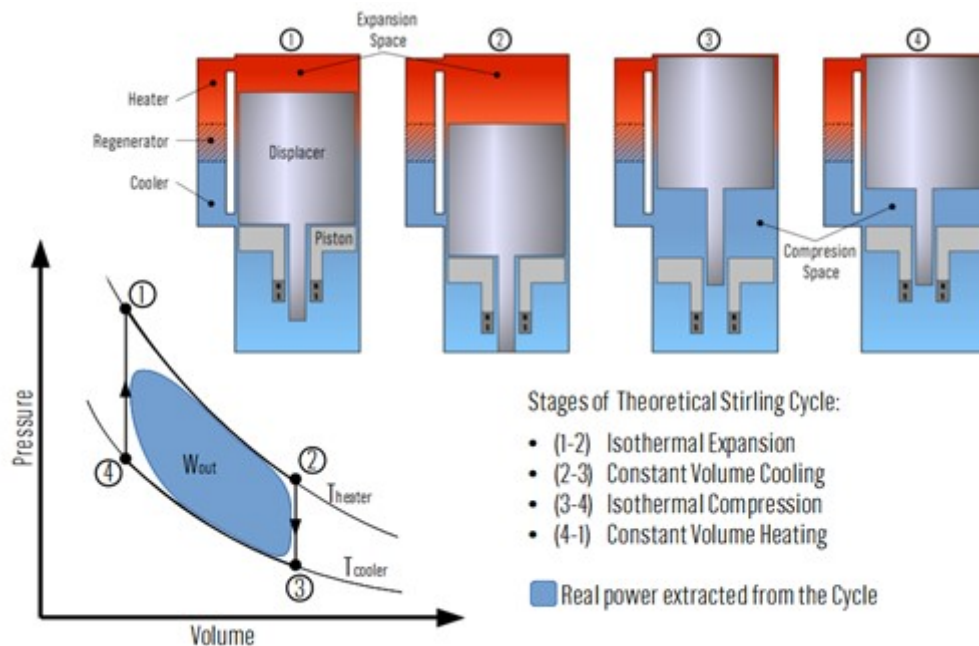


Figura 10: Esquema del proceso ocurrido en un ciclo Stirling.

Figura 11: Gráfica de presión frente a volumen en un ciclo Stirling.

Fuente: www.jemsengine.wordpress.com

Si por el contrario surge la no existencia de un regenerador, el motor también funciona, pero su rendimiento es inferior. Hay algunos aspectos básicos por entender en la operación de un motor Stirling (3):

- El motor tiene dos pistones y un regenerador, el cual divide el motor en dos zonas, en las cuales la primera posee mayor temperatura que la segunda.
- El regenerador consiste en un medio poroso, capaz de absorber o ceder calor, y de conductividad térmica despreciable.
- El fluido de trabajo está encerrado en el motor, y los pistones lo desplazan de la zona de mayor temperatura a la de menor temperatura, o viceversa, en ciertas etapas del ciclo. por tanto, se trata de un ciclo cerrado.
- Cuando se desplaza el fluido desde la zona de mayor temperatura a la de menor temperatura, o al contrario, este deberá atravesar el regenerador.
- El movimiento de los pistones es sincronizado para que obtenga trabajo útil.
- Se supone que el volumen muerto es cero y el volumen de gas dentro del generador es despreciable, en el caso del ciclo teórico. Como en el ciclo real esto no ocurre, el rendimiento por tanto, será algo inferior.
- En el ciclo teórico se supone que la eficiencia del regenerador es del 100%, es decir, devuelve todo el calor almacenado y, además, con recuperación total de temperaturas.

Por consiguiente, si el rendimiento es 100% eficiente, el motor Stirling tiene el potencial de alcanzar el rendimiento de Carnot, como se mencionó anteriormente.

Durante esta época, se dio el perfeccionamiento de las herramientas y de las máquinas-herramientas, lo que sumado al conocimiento del petróleo y los combustibles fósiles, le abre el horizonte al hombre para construir la máquina de combustión de vapor, o de combustión externa, que requería de una caldera para su funcionamiento. El tamaño de la caldera limitó las aplicaciones de dicha máquina en los medios de transporte.

El automóvil requería un principio más eficiente y práctico, pero el tiempo propicio para los motores de combustión interna no había llegado aún.

Otros intentos posteriores con el principio del motor Stirling, los harían W. Lehmann, hacia 1860, quien diseñó un motor sin regenerador y, más tarde, hacia el año 1876, A.K. Rider desarrollaría otra modificación, separando ambos pistones, los cuales estaban conectados por medio del regenerador (1).

3.10.-Primeros indicios teóricos en base al motor de combustión interna.

Con el avance en el estudio de la energía y de las propiedades termodinámicas de los gases, el ingeniero Wilhelm Schmidt, en Alemania, pudo establecer en 1816 las condiciones teóricas y los procesos básicos para el funcionamiento de los motores de combustión interna.

Hacia 1854 el presbítero Eugenio Barsanti y Felipe Matteucci (Italia) presentaban, como invento propio, el primer motor de combustión interna que llegaba a operar en forma permanente y práctica hasta ahora recordado a lo largo de la historia. (2)

3.11.-Máquina de combustión interna de Beau de Rochas.

Entre 1856 y 1862, el ingeniero Francés Beau de Rochas (1815-1891), siguiendo la gran tradición analítica de los ingenieros de l'Ecole Polytechnique, hace varias investigaciones que publica en un pequeño libro en el que, basándose en los principios de la termodinámica de la época, estableció un ciclo teórico de procesos termodinámicos de un gas en un cilindro rígido, que sería capaz de sustentar el funcionamiento de una máquina de combustión interna de cuatro tiempos, funcionando con gas combustible, que fuera eficiente. (2)

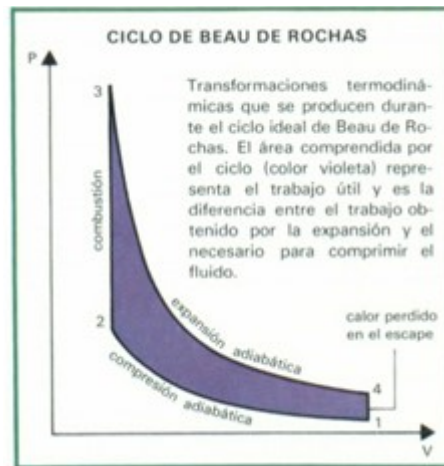


Figura 12: Gráfica de la presión frente al volumen en el ciclo de Beau de Rochas.

Fuente: www.diccionario.motorgiga.com

El funcionamiento de dicha máquina se fundamentó en los puntos que se exponen a continuación.

- Alcanzar la mayor compresión posible de los gases de combustión.
- Obtenerla expansión de los gases durante la combustión, de modo que el pistón sea lanzado hacia abajo del cilindro con gran impulso.
- Alcanzar la mayor velocidad del pistón, para su recorrido y transmisión de movimiento al eje, tanto que le permita conservar el movimiento algún tiempo después de haber aplicado la fuerza de los gases.

Se debe señalar, que Beau de Rochas, no llega a construir modelo alguno de su invento, a pesar de que su teoría expresada en su patente era muy convincente. (1)

3.12.-Motor de combustión interna de Lenoir.

Correspondiente al francés Joseph Etienne Lenoir (1822-1900) la fabricación del primer motor de combustión interna, en 1859, no era muy eficiente (5%), pero incluía una bujía para el encendido de la mezcla. Este motor era de un solo pistón y un solo tiempo. Para regresar el pistón, había que hacer otra combustión del otro lado del mismo, por lo que requería de dos sistemas de ignición, que Lenoir resolvió usando un solo alambre que abarcaba ambos lados del pistón. Este motor, que era movido por gas de carbón mezclado con aire, fue de tipo experimental y dio la pauta para que otros ingenieros profundizaran en los motores de explosión que vendrían después.

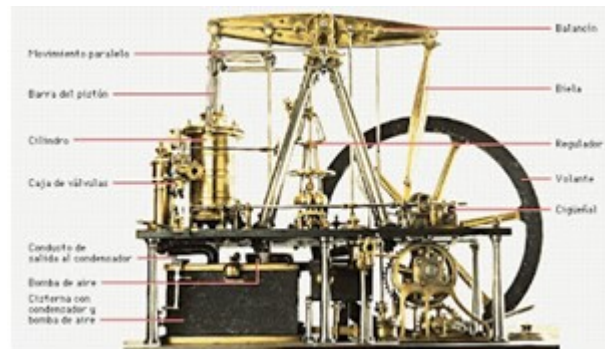


Figura 13: Motor de combustión interna de Lenoir.

Fuente: www.inventors.about.com

Sus posibilidades de uso práctico quedaron demostrados al año siguiente (1860), cuando se pudo construir el primer automóvil sin caballos que usaba un motor de combustión en lugar de uno de vapor, como el que construyera en 1767, Joseph Nicolás Cougnot, también en Francia. (2)

3.13.-Inicios en el motor de cuatro tiempos Otto.

La ocasión ya estaba madura para volver a intentar la construcción de coches autopropulsados con un motor de combustión interna. En Europa, ya en Estados Unidos se había generalizado ya el uso de los derivados del petróleo, como combustible en las calderas y lámparas de iluminación. Ya podía pensarse en motores de combustión que usaran keroseno, gasolina u otro derivado del petróleo. En esas condiciones propicias, el mecánico alemán Siegfried Marcus, construyó en 1864 su primer coche de motor con gasolina y lo probó satisfactoriamente, pero que decidió seguir perfeccionándolo en los años posteriores, hasta 1875, cuando hubo de abandonar esta tarea por falta de recursos financieros. (2)

Hacia 1867, el ingeniero alemán Nikolaus August Otto (1832-1891), ayudado por su auxiliar mecánico E. Langen, desarrolló un motor de combustión que superaba ligeramente el de Lenoir, aprovechando el movimiento de un pistón libre para generar trabajo, pero seguía siendo un motor de los denominados atmosféricos, ya que no incluían compresión previa de la mezcla. Otto continuó su trabajo de investigación y fue así como logró, en 1876, construir el primer motor de cuatro tiempos de la historia.

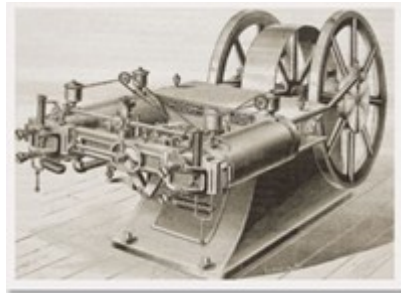


Figura 14: Ilustración del primer motor Otto.

Fuente: www.mundomotor.net

Este motor, que utilizaba los principios descritos por De Rochas, admitía en una carrera la carga de aire y gas de carbón, luego, en otra carrera la comprimía, y después de una explosión se producía la carrera de expansión. No obstante, habiendo sido el primero en construir este tipo de motores, su patente fue demandada años más tarde y, en efecto, le fue denegada su validez en Alemania hacia 1884. A pesar de esto, la historia le atribuye los créditos a Otto, justificando este hecho en que fue el primero en construirla. Éste ciclo será analizado a posterior, a la hora de profundizar dentro de los motores de combustión interna de encendido por chispa. (1)

3.14.-Primeros desarrollos en motores de combustión interna.

El interés por hacer y mejorar motores de combustión, había prendido en Francia, Alemania e Inglaterra. George Brayton inventó en Gran Bretaña, en 1873, el motor que lleva su nombre, movido por keroseno. En 1876, el ingeniero escocés Dugald Clark (1854-1932), construyó el primer motor de gas, de dos tiempos, que lleva su nombre. (1)

Una variante del motor de combustión interna fue presentada por el ingeniero alemán Rudolf Diesel (1858-1913). Conocido como el motor Diesel, este invento lo desarrolló durante los años 1893 y 1898; consistía en utilizar el calor del aire altamente comprimido para encender una carga de combustible inyectada en el cilindro, lo que permitió doblar la eficiencia por encima de otros motores de combustión interna de la época, mediante relaciones de compresión mayores, sin detonación o golpeteo, que era el problema que tenían hasta entonces los motores de tipo Otto, en los cuales no se había logrado superar la relación de compresiones de 1:4. Cuando, en 1879, el ingeniero Rudolf Diesel presentó su primer motor práctico, ya se estaba experimentando con motores eléctricos para las locomotoras, pero la potencia de la máquina Diesel, poco a poco fue ganado terreno, especialmente en líneas de largo recorrido y escaso tráfico. Este ciclo, al igual que el ciclo Otto, será estudiado a posterior, cuando se traten los motores de combustión interna por ignición.



Figura 15: Ilustración del primer motor de Rudolf Diesel (1858-1913).

Fuente: www.motorydominio.com.mx

Uno de los más recientes desarrollos ha sido el motor de combustión interna rotativo. Aunque una amplia variedad de motores rotativos experimentales han sido propuestos a través de los años, el primer motor de combustión interna rotativo práctico, el Wankel, se probó con éxito en 1957. Ese motor, que evolucionó a través de muchos años de investigación y desarrollo, estaba basado en los planos del inventor alemán Félix Wankel.

Los combustibles también han tenido gran impacto en el desarrollo del motor. Los primeros motores quemaban gas de carbón para generar potencia mecánica. La gasolina y derivados ligeros del petróleo, estuvieron disponibles a finales de 1800.

Varios tipos de carburantes fueron desarrollados para vaporizar el combustible y mezclarlo con aire. Antes de 1905, existían pocos problemas con la gasolina y los combustibles que se disponían eran altamente volátiles, permitiendo un fácil encendido en frío y tenían buen desempeño en el motor. Sin embargo, las relaciones de compresión eran muy bajas (cuatro o menos) para reducir el golpeteo, pero impedían aumentar la potencia y la eficiencia del motor. (2)

Una seria escasez de petróleo crudo, produjo el aumento de la demanda de gasolina entre 1907 y 1915, por lo que la producción de petróleo tuvo que ser incrementada. Por medio del trabajo de William Burton (1865-1954) y la empresa Standard Oil, en Indiana (EE.UU), se desarrolló un proceso de craqueo térmico, por medio del cual los crudos pesados fueron calentados bajo presión y descompuestos en derivados menos complejos y más volátiles. Este proceso cubrió la demanda de gasolina, pero sus altos puntos de ebullición crearon problemas de arranque en frío. Afortunadamente, en 1912 los encendidos eléctricos hicieron su aparición y ocuparon la solución de este problema.

3.15.-Primeros indicios sobre el motor Wankel o rotativo.

Otra de las tecnologías más importantes descubiertas a lo largo de la historia del automóvil, se trata del motor rotativo, también conocido como motor Wankel, el cual debe su nombre a su diseñador, el profesor Félix Wankel.

Wankel, se trataba de un autodidacta alemán, quien imaginó conseguir un mayor rendimiento mediante un motor que funcionara circularmente, que con los ya motores clásicos, los cuales convertían el movimiento lineal de un pistón, en un movimiento circular gracias a un mecanismo de biela y manivela. (4)



Figura 16: Félix Wankel, con su prototipo de motor rotativo.

Fuente: www.revistasexcelencias.com

Fue a mediados del año 1954, cuando Félix Wankel consiguió encontrar la forma idónea para diseñar las dos piezas características de su motor, el estator y el rotor, los cuales giraban en su interior. De esta manera, pretendía interesar a la compañía NSU en su proyecto, que tardó mucho en concretarse.

Las diversas razones por las cuales se mostró tanto interés, fueron su simplicidad, su elegancia y sus reducidas dimensiones. El principio parecía brillante y aunque algunos aspectos presentaban numerosos problemas, se poseía el pensamiento de poder superarlos.

El estator hacía de bloque estático, mientras que en su interior estaba ubicada una cámara, donde se hacía girar a un pistón sobre un eje excéntrico. De esta forma, se creaba entre el estator y el rotor, tres cámaras cuyo volumen y ubicación, iban variando respecto al movimiento del rotor. Estas tres cámaras, eran sinónimo de tres tiempos. La admisión/compresión, la explosión/expansión y la expansión/expulsión. A su vez, la admisión y el escape se realizaban a través de lumbreras, motivo por el cual no requerían de válvulas, ni de árboles de levas.

Años más tarde, en 1964, es cuando la compañía NSU lanza su primer modelo Spider, el cual parecía el motor del futuro. (2)

La mayoría de firmas automovilísticas del momento, compraron la licencia para construir este tipo de mecanismo, debido a que era fácil y económico de construir, con un tamaño reducido y apenas sin piezas en movimiento.

Sin embargo, sólo algunos constructores osaron lanzar un automóvil dotado de dicho propulsor y, desde la década de 1980, solamente Mazda ha continuado ofreciendo el motor rotativo.

Recientemente, en el presente año, dicha compañía japonesa ha confirmado su nuevo modelo de motor Wankel, de código 16X, el cual sustituirá a su actual modelo, el Renesis. De esta manera, se podrán solucionar varios de los problemas que presentaba actual motor rotativo, es decir, su alto consumo de aceite en la zona alta del cuenta-vueltas y su insuficiente par-motor mostrado a bajas revoluciones. Además, esta clase de motor debe cumplir la normativa vigente de anticontaminación, por lo cual deberá presentar un menor consumo y una menor cifra de emisiones. Para ello, empleará una mayor carrera y como consecuencia, un cubicaje mayor, exactamente de 1,6 litros. A su vez, se está estudiando la posibilidad de equipar al nuevo prototipo de motor Wankel con bujías láser. (5)



Figura 17: Motor rotativo, modelo Mazda 16X.

Fuente: www.wot.motortrend.com

Esta clase de motor, será estudiado más a fondo en los siguientes apartados del presente estudio.

3.16.-Entrada del tetraetilo de plomo ((CH₃CH₂)₄Pb) en el automovilismo.

El periodo siguiente a la Primera Guerra Mundial, mostró mejoras en los estudios acerca de la forma en la cual los combustibles afectan a la combustión, en especial el problema del golpeteo. El efecto antidetonante del tetraetilo de plomo ((CH₃CH₂)₄Pb) fue descubierto por General Motors, y estuvo disponible comercialmente, como aditivo para la gasolina en Estados Unidos, en 1923. Veamos a continuación las propiedades que proporcionaron la viabilidad comercial dicho antidetonante. (1)

3.16.1.-Propiedades del tetraetilo de plomo ((CH₃CH₂)₄Pb).

Consiste en un componente de química organo-metálicatóxico, el cual ha sido usado en la gasolina con plomo Súper, de 97 octanos y en la Normal, de 92 octanos como aditivo antidetonante. El plomo (Pb), al no intervenir en la combustión debido a no ser reactivo ante ésta, es expulsado junto con los gases de escape.

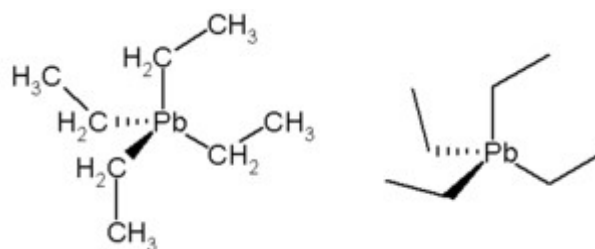
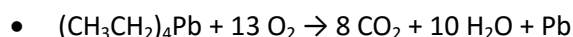


Figura: Molécula del tetraetilo de plomo ((CH₃CH₂)₄Pb).

Fuente 18: www.esacademic.com

Hablar del plomo (Pb), es hablar de un metal pesado y venenoso para el cuerpo humano, ya que es nocivo ante el sistema nervioso. Su acción tóxica sobre el organismo es producido a dos niveles tales como son el corazón y sistema nervioso central, produciendo un progresivo aumento de la sensibilidad del miocardio a la adrenalina y un efecto anestésico. (6)

Una de las principales características del tetraetilo de plomo, es la fragilidad de sus cuatro enlaces carbono (C) y Plomo (Pb). A las temperaturas en las que se encuentran los motores de combustión interna, el (CH₃CH₂)₄Pb se descompone completamente en plomo (Pb), óxidos de plomo (PbO), en radicales etil y combustibles de corta vida. El plomo (Pb) y los óxidos de plomo (PbO), remueven los radicales intermedios en las reacciones de combustión. De esta forma, se previene la combustión del combustible sin quemar durante la fase de escape. El plomo (Pb) es en sí mismo el agente anti explosivo, y el tetraetilo sirve como un portador gosolino-soluble. Cuando el (CH₃CH₂)₄Pb se quema, este no sólo produce dióxido de carbono (CO₂) y agua H₂O sino también plomo (Pb).



El plomo resultante, se puede oxidar más para dar especies tales como óxido de plomo (PbO):



El plomo (Pb) y óxido de plomo (PbO), se sobre acumularán rápidamente dañando el motor, por lo que se utilizan los aditivos 1,2-dibromoetano y 1,2-dicloroetano junto al tetraetilo de plomo para remover de esta forma el plomo en forma de los compuestos volátiles, tales como el bromuro de Plomo (PbBr₂) y cloruro de plomo (PbCl₄), los cuales son expulsados del motor hacia la atmósfera. (6)

El Plomo (Pb), era uno de los aditivos capaces de aumentar el octanaje. Existían otros como el etanol (CH₃-CH₂-OH), pero el primero era más barato. Emitía unos pocos gramos de plomo (Pb) tóxico a la atmósfera con cada depósito. Al quemarse el tetraetilo, se liberaba el plomo y producía acumulación de este metal dentro del motor. Para evitarlo se añadía otro aditivo de bromo (Br) o cloro (Cl), que lo eliminaba hacia la atmósfera, aunque esta acumulación también tenía un efecto positivo. El plomo (Pb) acumulado en los asientos de válvula, amortiguaba el golpeteo de éstas, por lo cual, no se recomendaba usar exclusivamente

sin plomo 95 o 98 en un motor no pensado para usar el nuevo combustible. El posible daño no era inmediato sino que debía aparecer al cabo de varios miles de km.

Para evitar el problema y emitir menos plomo (Pb), se podía intercalar un depósito con gasolina con plomo (Pb) entre cada 4 o 5 de sin plomo. Siempre que el octanaje del combustible sin plomo no sea insuficiente para el buen funcionamiento del motor.

Actualmente, ha de emplearse gasolinas sin plomo, las cuales emplean otros elementos no contaminantes como antidetonante.

3.17.-Primeros indicios de factores negativos frente a los combustibles fósiles.

A finales de los treinta, Eugene Houdry encontró que aceites vaporizados pasados a través de un catalizador activado a una temperatura entre 450-480°C, se convertirían en gasolinas de alta calidad, superando la producción por craqueo. Éstos y otros avances permitieron que combustibles con mejores propiedades antidetonantes fueran producidos en grandes cantidades, además, las relaciones de compresión aumentaron notablemente, mejorando la potencia y la eficiencia. (1)

Durante las pasadas tres décadas, han surgido dos nuevos factores que afectan significativamente el diseño y desempeño del motor. Estos factores son:

- El control de las emisiones contaminantes.
- La reducción del consumo de combustible.

El problema de la contaminación del aire apareció en Los Ángeles en los años cuarenta. Se identificó la principal fuente de contaminación del aire en los vehículos, ya que esta ciudad poseía muy poca industria. En 1952, fue demostrado por el profesor A. J. Haagen-Smit que el problema era el resultado de las reacciones entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, en presencia de luz solar, siendo contaminantes foto-reactivos. (2)

A raíz de lo anterior, fue evidente que el automóvil era el mayor contribuyente de emisiones de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, y también el principal responsable de los altos niveles de monóxido de carbono (CO) en las áreas urbanas. Como resultado de estas investigaciones, se introdujeron normas de emisiones para los automóviles inicialmente en California y posteriormente en Estados Unidos, Japón y Europa. En éstos últimos incluso para motores de combustión interna destinados a otras aplicaciones. Gracias a la implementación de catalizadores en los sistemas de escape y a la normatividad acerca de la gasolina sin plomo, se han logrado reducciones sustanciales en las emisiones de gasolina y diesel. El control de emisiones y estas mejoras en los combustibles han producido significativos cambios en los parámetros de operación y diseño en los motores de combustión interna.

Los motores de combustión interna son también una fuente importante de ruido. Hay varias fuentes de dicho fenómeno en el motor, tales como:

- Sistema de escape.
- sistema de admisión.

- Sistema de ventilación en la refrigeración del motor.
- Culata del motor.

Muchas investigaciones sobre el uso de combustible alternativos al diesel y a la gasolina están surgiendo, entre ellos combustibles como el gas natural, el etanol, el metanol, combustibles de origen vegetal no derivados del petróleo, las gasolinas sintéticas y el hidrógeno, el cual estudiaremos en profundidad.

Es interesante observar como en los motores de combustión interna, que llevan aproximadamente 125 años desde su invención, no se han logrado grandes mejoras en su rendimiento, siendo de un 11% a un máximo de 30% para motores de encendido por chispa, a pesar de los avances y desarrollos tecnológicos que existen a día de hoy, y considerando la cantidad de aplicaciones que se verían beneficiadas por una mejora sustancial en este aspecto.

Sólo se puede pensar en que han existido factores que hacen que estos avances se den a un ritmo menor del esperado, entre otros (7):

1. **Las legislaciones referentes a los controles de emisiones**, ya que éstas han hecho que se les dé más atención a la reducción de los niveles de emisión de contaminantes, lo que implica también que las investigaciones en el campo de las mejoras en el consumo de combustible del motor sean aún más difíciles de superar.
2. **La irreversibilidad del proceso**, pues el nivel de degradación en el proceso de conversión de energía inherente a la combustión es alto, y sólo hace poco tiempo se ha logrado construir un puente entre la energía química contenida en el combustible y la energía mecánica, sin pasar por la combustión, esto por medio de las denominadas celdas de combustible, las cuales realizan dicha transformación energética directamente a energía mecánica a través de reacciones electroquímicas, y llevan a cero el factor de contaminación, debido a que no se quema combustible fósil.
3. **La búsqueda de un desarrollo sostenible**, que ha centrado la mirada de la comunidad científica en el desarrollo de fuentes de energía alternativa más limpias que posea características de comportamiento simbiótico entre el ambiente, la naturaleza y el avance tecnológico del ser humano.

Sorprende, el proceso de recurrencia que se da actualmente en el desarrollo de la historia de los motores de combustión interna, pues, debido a la situación ambiental que el hombre ha generado desde tiempo atrás, se ha visto en la necesidad de recurrir a la producción de energía por medio de métodos empleados anteriormente, pero utilizados en ellos los avances tecnológicos actuales, como es el caso de los generadores de viento. Incluso se están implementando mejoras en el motor Stirling o de aire caliente, que antes había sido desplazado por el motor de combustión interna, todo con el fin de reducir el deterioro ambiental generado por los productos de la combustión.

A continuación, se va a proceder a tratar sobre la aparición y los primeros modelos de celdas de combustible, las cuales han abierto un nuevo horizonte en el automovilismo de éstos

últimos años. De esta manera, se ha dado lugar a la investigación y el desarrollo de una tecnología más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

3.18.-Aparición de las celdas de combustible.

A lo largo del siglo XX, los motores de combustión interna han experimentado un importante crecimiento tecnológico, que a su vez ha dado lugar a la contribución en gran medida, del crecimiento en la contaminación atmosférica.

Bebido a esta razón, en el presente siglo las celdas de combustible se están posicionando como una tecnología con gran penetración en diversas aplicaciones, las cuales van desde su empleo en baja potencia, hasta la generación de energía eléctrica en gran escala.

Uno de los grandes objetivos por parte de la comunidad científica a partir de esta tecnología, es la búsqueda de una producción limpia de energía, con altas eficiencias y a bajo coste. La humanidad, lleva más de veinte años estudiando la generación de energía eléctrica de manera eficiente, mediante el empleo de celdas de combustible. (7)

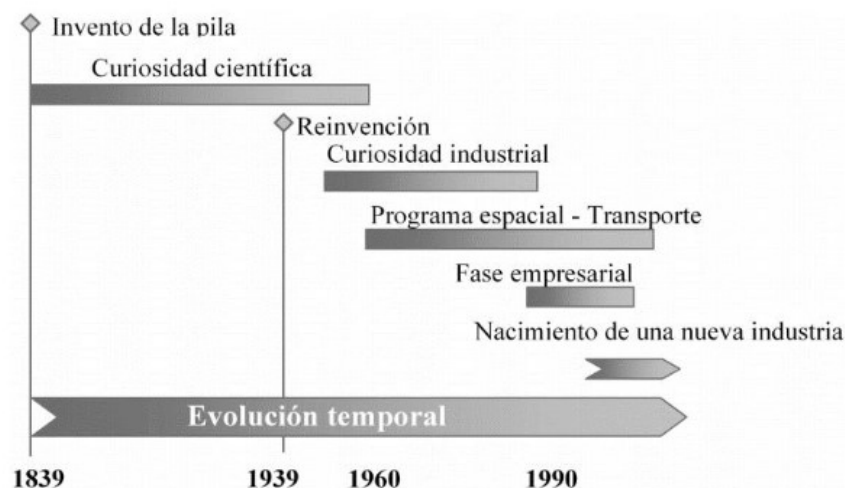


Figura 19: Cronograma de desarrollo de las pilas de combustible.

Fuente: www.slideshare.net

En la figura anterior, se observa el desarrollo cronológico de la celda de combustible a lo largo de la historia, las cuales se explicarán a continuación.

3.19.-Primeras investigaciones y prototipos de celdas de combustible.

3.19.1.-Celda de combustible de William Grove.

Los primeros indicios, datan de 1839, (8) cuando un jurista inglés, conocido por el nombre de William Grove, diseñó el primer prototipo. Para su preparación empleó dos

electrodos de platino sumergidos en el interior de un recipiente que contenía ácido sulfúrico, los cuales eran alimentados con oxígeno (O₂) e hidrógeno (H₂) respectivamente. A partir de la disociación del ácido sulfúrico, la reducción tenía lugar en el cátodo, alimentado con el oxígeno y reaccionando de esta forma con los protones del hidrógeno (H₂), para dar lugar a la molécula de agua. Tras esta reacción, intervenían los electrones, los cuales eran generados en el ánodo durante la oxidación del hidrógeno (H₂), que a su vez reaccionaba con el ion (SO₄)⁻² para formar ácido sulfúrico (H₂SO₄).

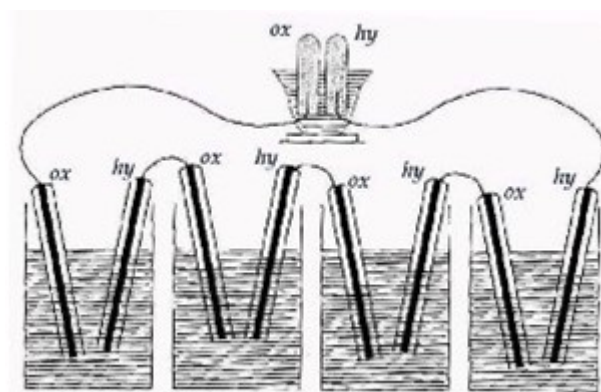


Figura 20: Esquema de la celda de combustible inventada por William Grove.

Fuente: www.cienciateca.com

Más tarde, se observó que al conectar cuatro de estos dispositivos en serie, se obtenía un importante generador eléctrico para poder descomponer la molécula de agua.

A partir de este primer modelo, numerosos inventores fueron introduciendo ciertas modificaciones, para que en 1855, Becquerel construyera una nueva celda consumidora de carbono a partir de un electrolito de nitrato fundido. Este, se encontraba contenido dentro de un recipiente de platino.

3.19.2.-Celda de combustible de Ludwig Mond y Carl Langer.

Ludwig Mond y Carl Langer, en el año 1889, (8) profundizaron en el trabajo de Grove tras diseñar y desarrollar una batería alimentada por gas, la cual también fue denominada celda de combustible. Como característica principal en sus celdas, emplearon diafragmas de poco espesor, de matrices no conductivas, impregnadas de electrolito y emparedadas entre electrodos metálicos.

La principal ventaja de este diseño, fue la obtención de corrientes de 2 amperios con tensiones del orden de 0,73 voltios. Debido a la desventaja en el alto costo del platino, se limitó el trabajo que tenían planeado a futuro.

Años después, en 1894, los dos científicos anteriores, emplearon como electrodos una serie de planchas de platino con diminutos orificios, los cuales fueron recubiertos con negro de

platino (Pt) y utilizando como electrolito ácido sulfúrico diluido en el interior de una matriz porosa.



Figura 21: Celda de combustible basada en el prototipo de Ludwing Mond y Carl Langer.

Fuente: www.fullissue.com

3.19.3.-Celda de combustible de William W. Jacques.

Para el año 1896, William W. Jacques, (8) un empresario de Boston, experimentó usando carbón como electrodos en su celda de combustible, llegando a ser una novedosa tecnología. Dicha celda, estaba compuesta por una barra central de carbón que actuaba como ánodos, el cual estaba contenido en el interior de un electrolito de hidróxido de potasio (KOH) fundido entre los 400 y 500°C. Para poder retener el electrolito fundido, se usaron contenedores cilíndricos de hierro, cumpliendo a su vez funciones como catalizadores en el cátodo y obteniéndose en desempeño excelente en la celda. Jaques obtuvo densidades en la corriente del orden de 100mA/cm² por cada voltio generado en los prolongados periodos de operación.

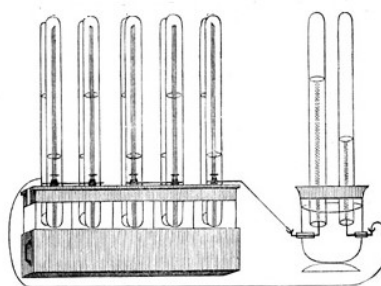


Figura 22: Esquema de la celda de combustible de William W. Jacques.

Fuente: www.afinidadelectrica.com.ar

Posteriormente, experimento con un sistema de cien mono celdas cilíndricas, que se construyeron sobre la superficie de un horno plano a altas temperaturas. Como resultado, se demostraron importantes rendimientos durante periodos de medio año, generando alrededor de 1500W.

3.19.4.-Celdas de combustible de W. Nernst y de François Bacon.

Dos años después, W. Nernst, (9) sugirió un sistema de celda de combustible basado en una reacción de oxidación y reducción, ofreciendo una mayor flexibilidad y unas mayores opciones sobre los reactivos.

A su vez, François Bacon de la Universidad de Cambridge en Inglaterra, realizó varios estudios en celdas de combustible, tras usar sistemas alcalinos que no utilizaban metales nobles como catalizadores. En sus experimentos, encontró que los electrodos elaborados de níquel, funcionaban como buenos catalizadores para las reacciones electroquímicas del hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂). Además, encontró que el desempeño de la celda se mejoraba mediante el incremento en la presión de alimentación de los reactivos, tras realizar diferentes pruebas a 40 atmósferas. Para mantener una baja presión diferencial en las celdas de gran diámetro, se emplearon electrodos con una doble porosidad.

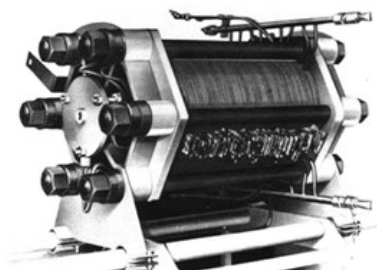


Figura 23: Celda de combustible de François Bacon.

Fuente: www.tpe-pille-lla.e-monsite.com

3.19.5.-Celda de combustible de bromuro de estaño y el primer tractor impulsado por celdas alcalinas.

En la década de los 50, (8) el profesor Posner de la Universidad de Florida, diseñó un sistema de oxidación y reducción usando soluciones de bromuro de estaño. Este sistema desarrollado, no fue adecuado para los viajes espaciales de esa época, debido a la dificultad en el bombeo de las soluciones químicas en estado de gravedad igual a cero. Mientras tanto, en 1959, el doctor Harry Irigh a través de la compañía Allis-Chalmers en Milwaukee de Wisconsin, introdujo el primer tractor impulsado por celdas alcalinas.

3.19.6.-Primeras aplicaciones en el Programa Espacial de los Estados Unidos.

Sin embargo, la primera aplicación práctica de las pilas de combustible, tuvo lugar en el Programa Espacial de los Estados Unidos. Para ello, General Electric desarrolló una pila alimentada por hidrógeno que se empleó en el Programa Gemini, a principio de la década de 1960. Este primer desarrollo fue seguido por el del Programa Espacial Apolo, el cual empleó pilas de combustible para generar electricidad empleada para el uso diario, así como en las redes de telecomunicaciones. Estas pilas fueron desarrolladas por Pratt y Whitney, basados en la licencia tomada sobre la patente de F. T. Bacon. (8)

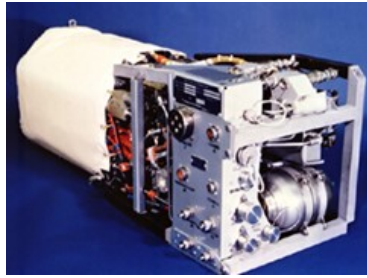


Figura 24: Celda de combustible empleada en el Programa Espacial de los Estados Unidos, Apolo.

Fuente: www.coopservi.es

3.19.7.-Primera celda de combustible aplicada al automovilismo.

A mediados de la década de 1960, (9) la compañía General Motors, incorporó una pila de combustible desarrollada por Unión Carbide, sobre un automóvil. A pesar de que las pilas de combustibles se han seguido empleando en todas las misiones especiales de los EE.UU hasta hoy día, éstas fueron apenas investigadas para aplicaciones terrestres. Esta situación cambió a partir de la década de 1990, al probar sistemas de pilas de combustibles en todo tipo de aplicaciones, principalmente en automovilismo.



Figura 25: Automóvil con celda de combustible.

Fuente: www.comunidadgreen.com

Otro importante desarrollo en estas últimas décadas, ha sido la investigación de algoritmos computacionales, los cuales se emplean en la implementación de programas a la hora de simular su comportamiento, desempeño y eficiencias.

3.20.-Implementaciones e investigaciones más recientes.

En las últimas décadas, numerosas facultades y centros de investigación han estado apostando fuertemente por este tipo de tecnología. Un claro ejemplo se da en la Universidad de Yale (E.E.U.U.), que junto con la fundación de Energía Limpia de Connecticut y con Fuel Cell Energy, se encuentran en la investigación sobre una planta de energía eléctrica, basada en las celdas de combustible. (8) Dicha celda de 250kW, suministraría el 25% de la energía necesaria en su centro de ciencia ambiental y su calor residual, podría ser utilizado para el control de su temperatura y humedad.

3.20.1.-Primeras redes de transporte público urbano de celda de combustible.

Otro claro ejemplo, es el de una de las principales compañías en celdas de combustible, la empresa Ballard. Ésta, diseñó sistemas de autobuses Mercedes Benz, basados en celdas de combustibles a Australia y a Reino Unido.

Años más tarde, la fuerza aérea de los Estados Unidos, probó exitosamente su gama de autobuses Enova Systems, basados en un sistema de celdas de combustible. A su vez, el departamento de tránsito en Ámsterdam (Holanda), comenzó a operar con cuatro autobuses impulsados por pilas de combustible, las cuales extraían hidrógeno de nueve tanques de agua dispuestos en su zona superior. Cada uno de ellos, era capaz de proveer el suficiente combustible para impulsar a un autobús durante una media de 250km. El costo de dicho proyecto fue de siete millones de euros, con una duración de dos años, gracias a las subvenciones proporcionadas por la Unión Europea, el ministerio de transporte holandés, el ayuntamiento de Ámsterdam, la Agencia de Energía y Medio Ambiente de Holanda y las compañías Daimler-Chrysler, Hoek Loos, Noun y Shell. (8)



Figura 26: Autobús Mercedes Benz, basando su funcionamiento en la celda de combustible.

Fuente: www.elmaravillosomundodelhidrogeno.blogspot.com.es

Con respecto al transporte público con empleo de hidrógeno utilizado a día de hoy, fuera de Europa parece estar perdiendo terreno y no se está invirtiendo capital en las nuevas tecnologías de pilas de combustible. Mientras tanto por el contrario, en Europa se encuentran en expansión varios proyectos, los cuales pretenden implantar esta tecnología en varios centros urbanos de importantes ciudades, con el fin de reducir notablemente las emisiones contaminantes. Principalmente, el mayor crecimiento se encuentra en las ciudades de Londres y Aberdeen en Escocia.

3.20.2.-Relaciones gubernamentales con respecto a la industria de las pilas de combustible.

La industria del hidrógeno (H₂), a pesar de encontrarse en una fase comercial, está a su vez en desarrollo. Durante los dos últimos años, han aparecido numerosos avances tecnológicos, principalmente el sector del automóvil, en las unidades portátiles y cargadores, así como en los sistemas de almacenamiento energético.

A la hora de hablar sobre el hidrógeno, es de gran importancia conocer el apoyo que reciben las diferentes unidades gubernamentales dentro de cada país o continente, ya que de éste depende su desarrollo y su despliegue.

En Europa, la convocatoria de FCH JU (Fuel Cell Hydrogen Undertaking), juega un papel de alta importancia en la cofinanciación de sus proyectos, pudiendo ser la financiación a nivel nacional o regional. Un claro ejemplo se encuentra en Alemania, que cuenta con un importante apoyo gubernamental a la hora de investigar nueva materia de cogeneración. A nivel regional, en Aragón, la Consejería de Industria e Innovación, apoya y ayuda a la Fundación Hidrógeno Aragón para la investigación en materia de hidrógeno (H₂). (9) También se ha de destacar el apoyo del gobierno británico, dentro de la movilidad basada en las pilas de hidrógeno, destacando entre sus programas de apoyo el UK-H₂ Movility. (8)

Por otro lado, en California (Estados Unidos) se cuenta con el SGIP (California's Self-Generation Incentive Program), el cual se trata del programa de financiación más importante en lo que a las pilas de combustible se refiere. Otras regiones de Norte América, tales como Conética, Nueva York y Nueva Jersey, cuentan a su vez con importantes programas de financiación, para la generación de pilas de combustible. (8)

3.20.3.-Celdas de combustibles aplicadas en el automovilismo más reciente.

Con respecto al automovilismo en estos últimos tres años, varias empresas de automóvil expandidas globalmente, se encuentran apostando fuertemente por esta tecnología, al igual que otras nuevas compañías las cuales se están dando a conocer por sus tecnologías basadas en la pila de hidrógeno (H₂).

Hyundai, ha sido el primer fabricante de coches que empezó a comercializar un vehículo de pila de combustible en el año 2014, tras lograr el primer contrato de arrendamiento en Estados Unidos.



Figura 27: Hyundai ix35 FCEV, primer vehículo de pila de combustible comercializado.

Fuente: www.gacetadelmotor.com

Posteriormente, en 2015, Toyota ha comenzado la venta de sus vehículos de pila de combustible de hidrógeno, destacando su Toyota Mirai. (10) En sus inicios, fue comercializado en Japón, para a continuación dar su aparición en Estados Unidos y Europa. Seguido, se analiza el modelo mencionado.

3.20.3.1.-Toyota Mirai.

Se trata de un automóvil, el cual se vale del hidrógeno para la generación de electricidad, emitiendo como residuo únicamente agua, por lo que da lugar a un impacto medioambiental mínimo. Para ello, basa su empleo en un sistema de pila de combustible, que incorpora tecnología de pila de hidrógeno y tecnología híbrida, en la cual los depósitos de hidrógeno proporcionan una elevada presión. (10)



Figura 28: Toyota Mirai.

Fuente: www.toyota.es

Contiene un mecanismo más eficiente desde el punto de vista energético que los motores convencionales de combustión interna, ya que no da lugar a dióxido de carbono (CO₂) ni a otros gases contaminantes tras su reacción.

El sistema propulsor del Mirai lo componen, a grandes rasgos, los siguientes elementos: un motor eléctrico, una pila de combustible, dos depósitos de hidrógeno y una batería.

Al bombear hidrógeno en el Mirai, el gas se desplaza hasta unos depósitos de combustible con filtro de carbono, donde se almacena. Una vez en movimiento, las rejillas delanteras de admisión llevan aire del exterior hasta la pila de combustible mientras que el hidrógeno va desde los depósitos hasta el mismo sitio. En ese lugar, se experimenta una reacción química, de la que resulta la electricidad que hace funcionar el vehículo. Al pisar el acelerador, la electricidad de la pila de combustible es enviada al motor eléctrico.

Dicho motor eléctrico, está colocado por delante del eje delantero y da una potencia máxima de 154 CV. La electricidad que lo alimenta proviene principalmente de la pila de hidrógeno, que está ubicada bajo los asientos delanteros. Dicha pila de hidrógeno, es un dispositivo que hace reaccionar el hidrógeno con el oxígeno y que como resultado genera agua y electricidad. El oxígeno se obtiene del aire y el hidrógeno de dos depósitos, colocados en su parte posterior. En total, pueden almacenar una cantidad de 5kg de este gas, con una presión de 700 bares. De acuerdo con el ciclo de homologación, el Mirai consume una media de 0,76kg de hidrógeno por cada 100 km recorridos, con una autonomía de 550 km. Llenar estos dos depósitos de hidrógeno en una estación de repostaje, conlleva un periodo de tres a cinco minutos. (10)

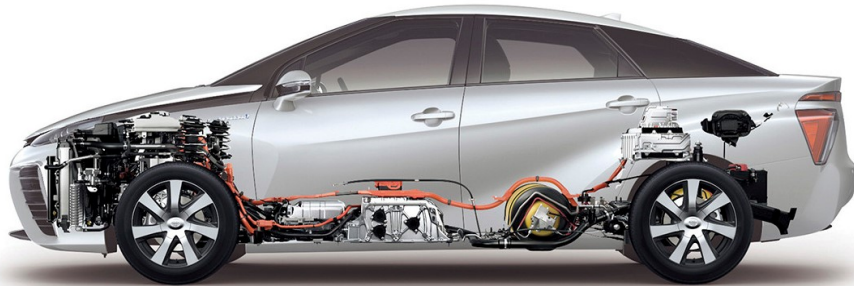


Figura 29: Perfil de los componentes del mecanismo de funcionamiento del Toyota Mirai.

Fuente: www.toyota.es.

La densidad energética de la pila es 3,1kW por cada litro de hidrógeno, que equivale a 2kW por cada kilogramo. Como se ha mencionado, la presión a la que se almacena el hidrógeno en los depósitos, posee un valor de 700 bares, ya que con una presión mayor se puede introducir más hidrógeno en los depósitos. Sin embargo, el coste energético extra y los refuerzos materiales necesarios no quedan compensados con el incremento de almacenamiento. Además, 700 bares es la presión de llenado que se ha acordado tomar como estándar en Europa, Estados Unidos y Japón.

La batería empleada, se encuentra compuesta por níquel e hidruro metálico, con una capacidad de 1,6kWh. Este elemento, ha de almacenar la electricidad generada tras la deceleración y por la pila. A su vez, a de alimentar al motor eléctrico, para así generar el movimiento rotatorio. (10)

Por el momento, no está prevista su comercialización en España, principalmente, por falta de una infraestructura de abastecimiento de hidrógeno, ya que en España sólo hay cinco estaciones. Éstas se encuentran en Zaragoza, Huesca, Albacete y Sevilla. Por el contrario, en Alemania, Dinamarca, Reino Unido, Estados Unidos y Japón, sí se encuentra a la venta.

3.20.3.2.-Audi h-tron quattro concept.

Otro de los modelos más innovadores dentro de los vehículos de pila de combustible, reside dentro de la compañía automovilística de Audi. Dicho modelo basa su funcionamiento en una pila de hidrógeno de 110kW compuesta por 330 celdas de combustible situadas en la estructura frontal.

Como sistema de almacenamiento energético, lleva incorporada una batería de ion litio (Li) capaz de proporcionar una potencia óptima. De esta manera, el sistema proporciona un par motor de sistema de 550Nm, con el cual logra alcanzar una velocidad de 200km/h y una aceleración de 0 a 100 en un intervalo de tiempo el cual ronda los 7 segundos. A su vez, como innovación dentro de este modelo, se le ha instalado un panel solar en su parte superior, capaz de generar hasta 320W, sirviendo como aparte energético hacia las baterías.



Figura 30: Audi h-tron quattro concept.

Fuente: www.audi.com

A la hora de iniciar el movimiento rotatorio de sus ejes, el vehículo emplea dos clases de motores eléctricos, el primero de 90kW situado en el eje delantero y el segundo de 140kW sobre el eje trasero. De esta forma el sistema consigue una tracción total. Para poder almacenar el combustible, es decir, el hidrógeno (H₂), el sistema utiliza tres depósitos de alta presión (70MPa), con un tiempo de repostaje de entre los cinco y los cuatro minutos, similar al de cualquier vehículo convencional, capaces de aportar una autonomía promedia de 600km, debido a que su consumo medio se establece en 1kg/100km. (11)

Otras compañías de alto reconocimiento tales como Daimler, GM, Ford, Renault, Nissan, Honda, Mercedes o Volkswagen, se encuentran invirtiendo importantes capitales, para su apuesta en esta nueva tecnología.

El lanzamiento de los vehículos de hidrógeno, ha de ir ligado a la ampliación o creación en muchos casos, de una serie de redes de repostaje. Japón, por su parte, es el país más avanzado en la instalación de este tipo de redes, con una cantidad de en torno a 100 estaciones de repostaje, fuertemente apoyadas por el gobierno japonés. A su vez, en California, la apuesta por el hidrógeno como combustible también es un hecho, ya que dispone de otra de las principales redes en el mundo.

A su vez, se encuentra en desarrollo e investigación, una nueva serie de pilas de flujo electrolítico, las cuales emplean como combustible una disolución acuosa de sales metálicas concentradas, para así generar electricidad. Entre una de las posibles disoluciones acuosas, se encuentra el agua marina, debido a sus altas propiedades contenidas en las sales disueltas. Esta novedosa tecnología, viene siendo investigada desde hace varios años por numerosas entes científicas, tales como la NASA, ya que dicha molécula es una importante fuente de este elemento. (8)

Esta tecnología, ha sido llevada a cabo muy recientemente por la compañía de celdas de combustible NanoFlowcell, la cual ha construido tres modelos de automóvil basados en dicha metodología. A continuación se analizan cada uno de estos tres automóviles.

3.20.3.3.-Quant e-Sport limousine.

Se trata de un automóvil deportivo, el cual presenta una tecnología de motorización eléctrica basada en una batería de flujo y una pila de combustible electrolítica capaz de otorgar al vehículo 600kilómetros de autonomía. Este sistema, alimenta a cuatro motores, para así poder alcanzar un pico de potencia de 680kW (920 CV), permitiendo una aceleración de 0 a 100 km/h en una media de tiempo de alrededor de 2,8 segundos. (12)



Figura 31: Quant e-Sport limousine.

Fuente: www.nanoflowcell.com.

Antes de nada, se ha de a partir desde el corazón de esta tecnología. En primer lugar, se encuentra una batería muy compacta, la cual se carga y descarga mediante el flujo de dos diferentes soluciones electrolíticas bombeadas a través de la pila de combustible. Mediante el uso de una fina membrana, se evita la mezcla de estos dos flujos durante su tránsito.

La energía capaz de ser acumulada mediante esta tecnología, va asociada a la cantidad de fluidos almacenados. Éstos principalmente se componen desales metálicas concentradas en una disolución acuosa, sin contener ningún tipo de elemento pernicioso hacia el medioambiente, características fundamentales que proporciona el agua marina. El primer prototipo de este automóvil, comparte los fluidos en dos tanques, los cuales suman 200 litros. Mediante el empleo de un potencial nominal de 600 V y una corriente de 50 A, el sistema ha logrado una potencia continua de 30kW.

El logro está, por tanto, en la composición de la solución electrolítica. Si se trata de densidad energética, el fabricante apunta una cifra de 600Wh/l, siendo una capacidad cinco veces superior a las baterías de iones de litio comercializados en los modelos de coches eléctricos actuales. Además, apenas se ha observado degradación alguna de esta pila de combustible, tras más de 10.000 ciclos de carga. (12)

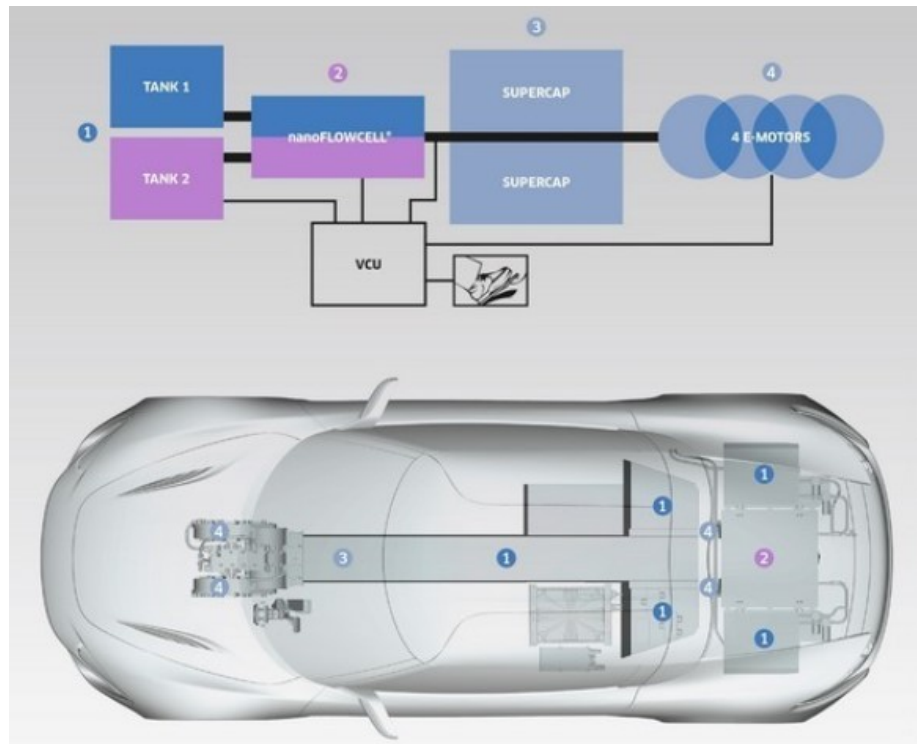


Figura 32: Esquema de funcionamiento del Quant e-Sport limousine.

Fuente: www.nanoflowcell.com.

Tras varios ensayos experimentales, los 200 litros de su depósito aportan una movilidad 120kWh en total. El fabricante señala que el consumo medio del Quant e-Sport limousine es de 20kWh cada 100 km. Esta media de consumo ha sido ponderada, y en cualquier caso, las futuras mejoras de las que se hablan no irían dirigidas a mejorar esa cifra, sino a acoplar mayores tanques de electrolito. (12)

Este vehículo se encuentra propulsado, como se ha comentado anteriormente, por cuatro motores que ofrecen tracción a las cuatro ruedas y una velocidad máxima de 380 km/h. El proceso energético en el tren de tracción, está supervisado por una unidad central. Esta es testigo de cómo la pila de combustible alimenta energéticamente una unidad de almacenamiento conformada por dos supercondensadores. A su vez, éstos también se aprovechan para regenerar energéticamente el vehículo durante la frenada, o en pendientes favorables. Todo este proceso electroquímico se mueve en una horquilla térmica de entre 60º y 160º, siendo por este motivo, que la actividad dentro de la pila de combustible es conocida como Cold Burning. De esta forma, se ostenta un elevado aprovechamiento energético de un 80%. Para el alojamiento de estos tanques de combustibles, se han elevado las bases de las ruedas en su estructura de fibra de carbono.

El deportivo, alberga cuatro plazas, con una longitud de 5,25 metros, 2,2 metros de ancho y 1,35 metros de altura. Su peso, alcanza los 2.300kg, con tanques llenos de combustible al 100%. (12)

La información que ha sido obtenida mediante su simulación en tres dimensiones, es referida al par motor de cada uno de sus cuatro motores y a la gestión de la pila de combustible.

3.20.3.4.-Quant-FE.

Este segundo modelo, representa el segundo automóvil en la etapa evolutiva dentro de este sistema, contando con un sistema de propulsión mejorada que permite desarrollar 1090 CV (801,69kW), mediante el empleo de sus cuatro motores eléctricos. Este segundo modelo, también cuenta con una transmisión de dos velocidades que se han desarrollado internamente, logrando una velocidad de 300km/h. (13)



Figura: Quant-F.

Fuente 33: www.nanoflowcell.com

Al igual que su predecesor, se impulsa mediante un sistema de baterías, las cuales emplean un líquido iónico a partir del agua marina, para el almacenamiento de la energía eléctrica. El alcance del vehículo, es de 800km de autonomía, cortesía de dos tanques para el combustible de 250 litros cada uno, uno con carga positiva y el otro con carga negativa. Su mecanismo, es similar al de cualquier otro funcionamiento de un vehículo de pila de combustible, es decir, produce una reacción entre los dos líquidos iónicos que generan una corriente eléctrica. Ésta, a continuación es almacenada mediante dos supercondensadores, conociéndose su configuración con el nombre de batería de flujo.

El Quant-FE, ofrece la posibilidad de alcanzar los 100km/h en un tiempo de 2,8 segundos, alcanzando como se ha comentado anteriormente, los 300km/h. Ofrece a su vez, la posibilidad de tracción en las cuatro ruedas motrices o de tracción trasera, mediante el control electrónico de su par vectorial. (13)

Mediante su sistema de batería de flujo mencionado anteriormente, se ha logrado una alimentación de 50A de corriente. Este sistema, es capaz de suministrar brevemente una intensidad 2000A, para lograr un rendimiento completo. Dicha finalidad es conseguida mediante la combinación de la batería de flujo con el sistema hidráulico de amortiguación.

Otra de las innovaciones importantes dentro de este modelo, se encuentra la tracción permanente en sus cuatro ruedas. Esta tecnología, se implementa mediante cuatro motores eléctricos, los cuales permiten su conversión automática en una tracción trasera. Dicha conversión se ejecuta debido el desembrague del eje delantero y de su posterior ejecución en modo ralentí. (13)

3.20.3.5.-Quantino.

La presente empresa alemana, presentó el pasado año, su tercer automóvil dentro de esta gama que emplea agua de mar como combustible. El Quantino, es un auto que ha sido diseñado en Alemania, pero fabricado en Corea del Sur, siguiendo la tendencia de fabricación en países asiáticos. Su principal diferencia con respecto a los anteriores, se trata de un mayor acercamiento de esta tecnología hacia el público masivo. (14)



Figura 34: Quantino.

Fuente: www.nanoflowcell.com.

Este automóvil, posee la capacidad de alcanzar los 200km/h, junto con una aceleración de 0 a 100km/h en 2,8 segundos, al igual que el modelo anterior. El sistema eléctrico del vehículo es alimentado por una pila de combustible capaz de extraer la energía necesaria a partir del agua de mar. El auto opera con un circuito electrónico de 48V dando lugar a 136 CV, mediante el uso de cuatro motores, los cuales permiten proporcionar una tracción independiente a cada rueda. A su vez, el vehículo posee dos tanques de 175 litros cada uno, proporcionando una autonomía de hasta mil kilómetros antes de requerir una nueva recarga.

El fabricante del Quantino indica que se ha creado la batería de este auto a partir de la tecnología empleada por la NASA. Las baterías de flujo Redox, fueron patentadas por la NASA en 1976, como parte del programa de almacenamiento energético en los viajes espaciales. Este sistema de baterías, permite almacenar energía durante su generación para así utilizarla posteriormente. Gracias a ésta tecnología, se logra generar una combustión en frío, en la cual la energía generada en este proceso es almacenada para su posterior uso en el auto. El problema con las baterías convencionales y las baterías de iones de Litio, radica en el efecto de desgaste en su capacidad de retener energía tras 500 o 1000 ciclos de carga. (14)

Ésta, no es la primera vez que se presenta este automóvil, pues ya en el 2009 se había diseñado un prototipo, pero en esta oportunidad la empresa ha proporcionado más detalles y se ha anunciado su autorización para poner en circulación el auto en el mercado alemán.

El lanzamiento de los vehículos de hidrógeno, ha de ir ligado a la ampliación o creación en muchos casos, de una serie de redes de repostaje. Japón, por su parte, es el país más avanzado en la instalación de este tipo de redes, con una cantidad de en torno a 100 estaciones de repostaje, fuertemente apoyadas por el gobierno japonés. A su vez, en California, la apuesta por el hidrógeno como combustible también es un hecho, ya que dispone de otra de las principales redes en el mundo.

Mientras tanto, a nivel europeo, se aprobó el 22 de octubre de 2014 la Directiva 2014/94/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos, en la cual se incluye el hidrógeno. Desde dicha fecha, los estados miembros tienen un plazo de dos años, para el desarrollo de sus planes de acción, transponiendo de esta manera dicha Directiva. (14)

3.20.4.-Desarrollos tecnológicos sobre la pila de combustible a nivel nacional.

Tras la fundación para el Desarrollo de Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón, se encuentra un proceso de desarrollo por parte de varios campos tecnológicos, en los que al sector del hidrógeno se refiere. (9) Uno de los principales ejemplos, se obtiene en el proyecto Elyntegration, con el cual se pretende producir hidrógeno a través de un electrolizador alcalino. En otro ámbito, tratando sobre el sector del transporte, se han desarrollado varias aplicaciones propulsadas mediante pilas de combustible, tales como la hidrolimpiadora de ciertos cascos urbanos o ciertas carretillas elevadoras. Se ha de destacar también, el desarrollo de una unidad robótica capaz de desactivar explosivos, alimentado por una pila de hidrógeno, investigada por la empresa Proytecsa. (8)

Con el paso del tiempo, el desarrollo de las pilas de combustibles se va incrementando, por lo que ha de prepararse para observar como los vehículos que emplean combustibles convencionales, comparten las carreteras con estos novedosos mecanismos de propulsión.

3.21.-Motores de combustión interna convencionales.

3.21.1.-Introducción.

En este siguiente apartado, se procede a tratar sobre los motores de combustión interna, mediante ignición por chispa y por compresión, junto con los sistemas que lo componen. Por lo tanto, se han de abordar sus componentes, funcionamientos, sistemas de lubricación, escape y regulación de velocidad entre otros, en estos tipos de motores empleados en la actualidad mediante el empleo de hidrocarburos convencionales.

El principio de funcionamiento de los motores de encendido a chispa o a gasolina, fue enunciado como bien se comentó anteriormente, por físico Beau de Rochas y llevado a la práctica en el año 1862 por el científico alemán Otto, de donde procede el nombre de su ciclo de transformaciones. Por otra parte, el funcionamiento de los motores de encendido por compresión o Diesel, fue enunciado en 1893 por el ingeniero alemán Rudolph Diesel. (2)

Para poder comenzar a profundizar dentro de ésta serie de motores de combustión interna, se han de analizar, en un primer lugar, los dos ciclos de funcionamiento correspondientes a cada modelo de motor. Éstos son el ciclo Otto y el ciclo Diesel correspondientemente.

3.21.2.-Motor de combustión interna a volumen constante, ciclo Otto.

El ciclo de Otto, se trata de un ciclo cerrado, en el cual el fluido de trabajo es una mezcla de comburente (aire) y gasolina que experimenta una serie de transformaciones. En especial, son seis etapas, aunque el trabajo realizado en dos de ellas se cancela. Dicho ciclo, se genera en el interior de un cilindro provisto de un pistón y ayudado de una chispa eléctrica mediante el sistema de encendido. A continuación, se estudia el flujo del fluido en cada una de las seis etapas dentro del ciclo ideal de Otto:

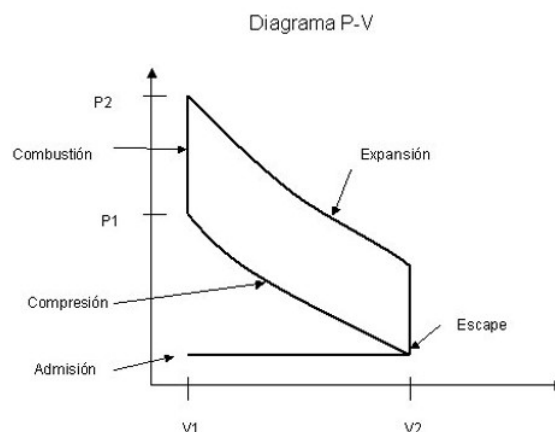


Figura: Diagrama de presión frente a volumen en el ciclo Otto.

Fuente 35: www.motoresymaquinas.blogspot.com

1. **Admisión:** En esta primera etapa, la válvula de admisión se abre, permitiendo la entrada en el cilindro de la mezcla de aire y combustible. Al finalizar dicha etapa, la válvula de admisión se cierra, por lo cual, el pistón se desplaza hasta el denominado punto muerto inferior.
2. **Compresión adiabática:** A continuación, la mezcla de combustible y comburente se comprime, sin intercambiar calor con el exterior. Esta transformación, es por tanto isentrópica y la posición que alcanza el pistón se denomina punto muerto superior. El trabajo realizado por la mezcla en esta etapa tendrá un valor negativo, numéricamente tratando, ya que ésta se comprime.
3. **Explosión:** En esta tercera etapa, la bujía se activa, salta una chispa y la mezcla se enciende. De esta manera, en esta transformación, la presión aumenta a volumen constante.
4. **Expansión adiabática:** La mezcla se expande adiabáticamente, por lo que durante este proceso, la energía química liberada durante la combustión se transforma en energía mecánica, siendo el trabajo considerado matemáticamente positivo.
5. **Enfriamiento isócoro:** Durante esta etapa, la presión decrece y la mezcla disminuye su temperatura liberando calor hacia el exterior.
6. **Escape:** Para finalizar, la válvula de escape se abre, expulsando al exterior los productos de la combustión por lo cual, el proceso vuelve a comenzar.

El trabajo total realizado durante el ciclo, es considerado de forma matemática positivo. Sin embargo, en el ciclo real, se generan una serie de diferencias con respecto al

ideal. Éstas se deben a la disociación química de los combustibles; la combustión no se produce a volumen constante, sino que este es variable debido al tiempo de apertura de las válvulas de admisión y escape, junto con el avance al encendido para evitar la detonación de los combustibles. Todo ello, es responsable de que el ciclo no se realice como lo define el teórico. En la siguiente figura, se ha representado un esquema del ciclo real de Otto superpuesto con el ideal analizado en las secciones anteriores. (15)

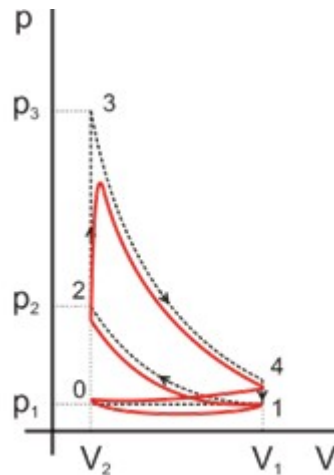


Figura 36: Ciclo real Otto en comparación con el ideal.

Fuente: www.fisicaactual.wordpress.com

En la figura, están indicados de forma aproximada los puntos del ciclo donde tienen lugar la explosión y el escape respectivamente.

3.21.3.-Motor de combustión interna de combustión a presión constante, ciclo Diesel.

Las transformaciones del fluido en el interior del motor, se realizan de acuerdo a un ciclo cerrado, el cual emplea aire a presión atmosférica o a una mayor en los sistemas de sobrealimentación, mientras que el combustible líquido inyectado, se enciende por las altas temperaturas que posee el aire (comburente) tras su compresión. Las transformaciones sufridas por el fluido durante el proceso, se explican a continuación:

Como se observa en la siguiente figura, en la carrera descendente del pistón, se aspira un volumen de aire, que ingresa en la cámara de combustión. A continuación, el pistón asciende, por lo cual, el aire es comprimido y alcanza una alta temperatura al alcanzar el pistón el punto muerto superior. En ese momento, se inyecta una cierta cantidad de combustible líquido pulverizado, que a medida que es ingresado se enciende dando lugar a una combustión a presión constante, en el modelo teórico. Seguido, se produce una expansión dando lugar a la carrera útil en el pistón, en cuyo transcurso se genera una cantidad de trabajo. Finalmente, en la carrera ascendente, los gases producto de la combustión son eliminados, repitiéndose nuevamente en ciclo. (16)

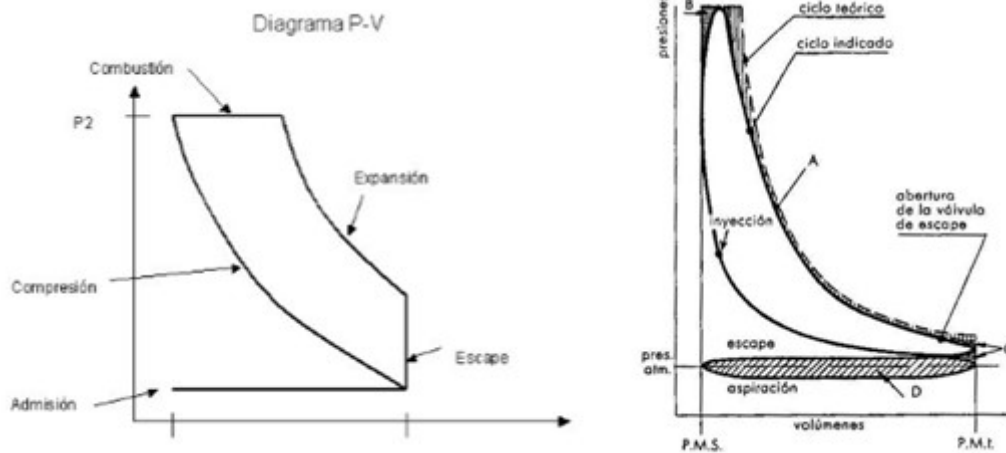


Figura 37: Ciclo Diesel teórico.

Figura 38: Comparación del Ciclo Diesel real, con el teórico.

Fuente: www.demotor.net

Por el contrario, en el ciclo real se dan importantes diferencias en la forma y en los valores de las presiones y temperaturas. Algunas de estas semejanzas corresponden a las del ciclo Otto, tales como, la variación de los calores específicos, las pérdidas de calor o el tiempo de abertura en la válvula de escape. Otras, por el contrario, difieren en parte siendo originadas por la disociación y las pérdidas durante el bombeo del combustible. Por último, una es peculiar dentro del motor Diesel en referencia a su combustión, la cual no se verifica a presión constante en el caso del ciclo real. En la siguiente tabla, se analizan cada una de las diferencias nombradas entre ambos ciclos.

1. **Combustión a presión constante.** Como se ve en el diagrama indicado, en la práctica la combustión se realiza en unas ciertas condiciones, en las cuales la presión varía durante el proceso, mientras que en el ciclo teórico se ha explicado que se mantiene constante. En realidad, una parte de la combustión es llevada a cabo a volumen constante, mientras que otra parte, es a presión constante. Tan solo, en el caso de los motores muy lentos se desarrolla de forma ligeramente aproximada al proceso teórico.
2. **Disociación de los productos de la combustión.** En un motor de combustión interna de ignición por compresión, la disociación no tiene un efecto tan importante como en el motor de encendido por chispa, por cuanto el exceso de aire y la mezcla de los productos de la combustión son tales, que reducen la temperatura máxima. Consecuentemente, esto también sucede en la disociación de dichos productos.
3. **Perdida por bombeo.** Las pérdidas por bombeo, son inferiores a las que se producen en un ciclo Otto, puesto que no hay estrangulamiento en el aire de aspiración. En los motores de encendido por compresión, no existe la válvula mariposa, característica de los motores de encendido por chispa, provistos de carburador. Por ello, la superficie negativa del ciclo Diesel real es menor que la del ciclo Otto.

Todo cuanto se ha analizado es referido a los motores de cuatro tiempos. En los de dos tiempos, bastante difundidos entre los de tipo Diesel, resultan importantes las pérdidas por bombeo y las causadas por la interrupción de la expansión antes del punto muerto inferior, dando lugar al escape. (16) Por lo tanto, en la pérdida por bombeo se debe considerar también el trabajo necesario para realizar el barrido del cilindro del cilindro, que a menudo se efectúa mediante un compresor.

3.21.4.-Similitudes y diferencias entre el ciclo Otto y el Ciclo Diesel.

En un motor de encendido a chispa, para evitar la detonación, se ha de evitar que en ningún momento de la carga se genere la ignición mediante compresión. Por el contrario, en un motor Diesel, ha de producirse lo antes posible, para evitar que durante el periodo de retraso se verifiquen condiciones que favorezcan la detonación. Por todo ello, los métodos para reducir la detonación son totalmente opuestos. (17)

En el motor de encendido por chispa, el aumento de la relación de compresión acerca un posible peligro de detonación, mientras que en los motores Diesel, ésta es disminuida, ya que aumentando la temperatura al final de la compresión, disminuye el retraso al encendido. Un aumento en la relación de compresión requiere para los carburantes un crecimiento en el número de octano, mientras que en el gasoil, permite un descenso en el número de cetano.

En la práctica, las relaciones de compresión para los motores Diesel, no son inferiores a 14/1 o 17/1, para así poder asegurar un satisfactorio arranque. (16) Debido a las mayores presiones alcanzadas, los motores de compresión son más pesados y robustos, siendo sus elementos de mayores dimensiones.



Figura 39: Modelo en Auto CAD sobre el interior de un motor de combustión interna de ignición por chispa.

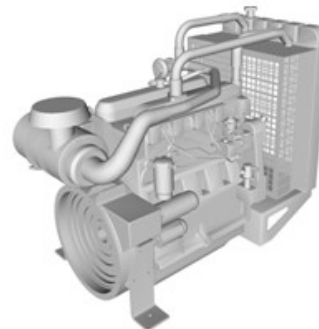


Figura 40: Modelo en Auto CAD sobre el interior de un motor de combustión interna de ignición por compresión.

Fuente: www.3dcadbrowser.com

A su vez, los motores Diesel, requieren de una mayor cantidad de aire para reaccionar y así compensar las malas condiciones de la mezcla. Dentro de ciertos límites, la combustión es mejor a mayor exceso de aire carburante, por lo que no es necesario regular la entrada de aire

al variar el régimen de marcha y la carga. (16) Por lo tanto, la variación de la carga se realiza únicamente sobre el combustible, teniendo como ventaja que para bajas cargas, al disminuir la resistencia del aire a la entrada por la falta de la válvula mariposa, aumentará el rendimiento por disminución de las pérdidas por bombeo. Finalmente, el motor suministra para cada regulación un par casi constante, al variar en número en sus revoluciones.

3.21.5.-Elementos que componen a los motores de combustión interna y sus características.

Una vez estudiados y analizados ambos ciclos para los dos tipos de motores convencionales, se procederá al tratamiento de sus componentes, explicando cada una de sus partes con sus semejanzas y diferencias.

3.21.5.1.-Sistema de bloques de entradas y salidas.

Un motor de combustión interna, es una máquina, la cual transforma la energía química presente en los combustibles, en energía mecánica disponible en su eje de salida. En un diagrama de bloques de entradas y salidas, se tiene como entrada al aire, la cual realiza la función de comburente y al combustible, junto con el aporte correspondiente a los sistemas auxiliares necesarios para su funcionamiento. Estos sistemas, se refieren a los mecanismos de lubricación, refrigeración y energía eléctrica. En el interior del motor se dan los sistemas de distribución, los mecanismos del pistón, la biela y la manivela, mientras que como sistema de salida se da la energía mecánica de salida, acompañada de una serie de productos resultado de la ineficiencia de los gases de combustión y del calor cedido al medio.

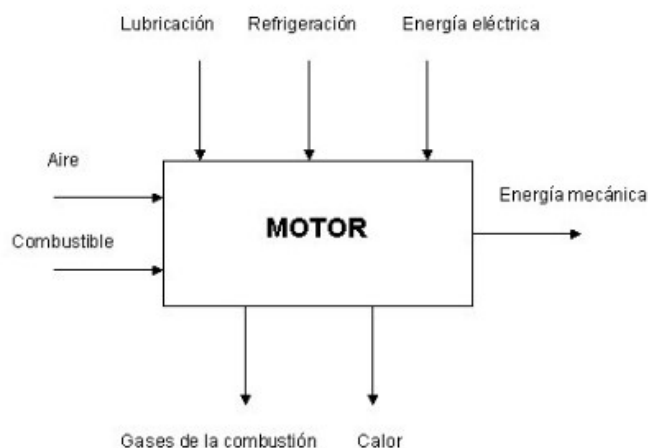


Figura 41: Diagrama de bloques de entradas y salidas.

Fuente: www.multiserviciosgerarmotors.blogspot.com

Los motores de combustión interna, como bien son conocidos, se emplean para la generación de un trabajo mecánico, siendo su empleo muy variado en un amplio rango de aplicaciones. Deben constar de los siguientes componentes (18).

Tabla 1: Elementos que componen un motor de combustión interna.

1. Sistema de suministro de combustible.
2. Sistema de suministro de comburente.
3. Dispositivo de mezcla combustible/comburente.
4. Cámaras de combustión.
5. Sistema de transformación de energía calorífica en movimiento alternativo.
6. Sistema de transformación biela y manivela del movimiento alternativo en movimiento rotacional.
7. Sistemas de lubricación.
8. Sistemas de refrigeración.
9. Sistema de regulación de velocidad.
10. Sistema de evacuación de los productos tras la combustión.

En este tipo de motores, se ha de tener en cuenta la denominada relación de compresión, definida como el número de veces el cual el volumen del cilindro formado por el pistón al estar en su punto muerto superior, las paredes del cilindro y la tapa del cilindro, se podría ubicar en el volumen de la cámara formado entre las paredes del cilindro, la tapa de dicho cilindro y el pistón al situarse en el punto muerto inferior. Dependiendo del tipo de combustible usado en el motor, la relación de compresión se considera variable.

3.21.5.2.-Sistema de lubricación.

Este sistema, se encarga de mantener lubricadas todas y cada una de las partes móviles de un motor, sirviendo a su vez de medio refrigerante. Posee una alta importancia, ya que mantiene en movimiento a ciertos mecanismos que poseen elementos los cuales se encuentran en constante fricción entre sí, que de otro modo se engranarían, aumentando este fenómeno con la temperatura reinante en el interior del motor.

Su función, consiste en permitir la creación de una cuña de aceite lubricante entre las partes móviles, evitando el contacto entre ellas, sin olvidar su función como refrigerante sobre las partes que poseen altas temperaturas al intercambiar calor con el medio ambiente, al circular por zonas de menor temperatura y al pasar a través de radiadores de aceite.

Consta básicamente de una bomba de circulación, un regulador de presión, un filtro de aceite, un radiador de aceite y conductos tanto internos como externos de circulación.

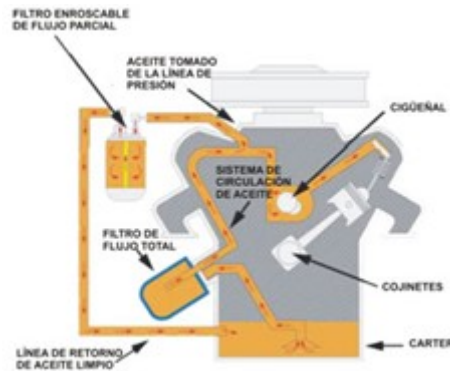


Figura 42: Sistema de lubricación en un motor de combustión interna.

Fuente: www.noria.mx/lublearn/entendiendo-la-filtracion-de-flujo-parcial-en-motores-de-combustion-interna.com

3.21.5.2.1.-Funcionamiento del sistema de lubricación.

El funcionamiento de dicho sistema consiste en los siguientes pasos:

En primer lugar, la bomba de engranajes toma el aceite del depósito del motor, usualmente el cárter, para enviarlo al filtro mediante una presión regulada. A continuación, se distribuye a través de los conductos interiores y exteriores del motor, hacia las partes móviles las cuales se desean lubricar.

Finalmente, atraviesa el radiador, de donde se extrae parte del calor absorbido y así poder retornar al depósito principal, para reiniciar el ciclo de nuevo.

Para el correcto funcionamiento de este sistema, ha de inspeccionarse tanto visualmente como de manera informática, para poder detectar fugas, presiones y temperaturas anormales, las cuales pueden influir negativamente sobre el motor. Los controles del sistema manuales, se realizan mediante la medición del nivel de aceite con su respectiva varilla de medición, para verificar el consumo o detectar pérdidas. Para controlar las condiciones del aceite y del circuito, se emplean manómetros de presión y termómetros. (18)

3.21.5.2.2.-Principales fallos en un sistema de lubricación.

Los principales fallos en el sistema, son básicamente la falta del nivel de aceite correspondiente debido a unas determinadas pérdidas o consumos elevados. También se pueden sufrir altas temperaturas en el aceite por un mal estado en el sistema de refrigeración o por el mal funcionamiento del motor; bajas presiones en el aceite debido a su degradación; un incorrecto funcionamiento de la bomba de circulación o del regulador de presión, o incremento en las holguras de ciertas partes móviles del motor, producto de un intensivo desgaste. (19)

3.21.5.2.3.-Mantenimiento sobre un sistema de lubricación.

Las reparaciones en el circuito, se basan bien principalmente en la limpieza de los componentes del circuito y en las aletas del radiador de aceite, o bien en el reemplazo de los filtros y cambios periódicos de aceite. Las reparaciones mayores, se limitan en el reemplazo de los componentes, los cuales hayan sido dañados en el circuito, tratándose la mayoría de elementos estáticos y solamente la bomba de circulación es susceptible a roturas al tener partes en movimiento.

Fundamentalmente, al trabajar en este sistema, se debe de tener una precaución para que el mismo no se encuentre bajo presión y de que el aceite este enfriado lo suficiente, como para que no dé lugar a quemaduras. Para el cuidado del medio ambiente, ha de tenerse la precaución de recolectar todos los drenajes de aceite evitando derrames y así, disponerlos adecuadamente. (18)

3.21.5.3.-Sistema de escape en un motor de combustión interna.

Este sistema, se encarga de la conducción de gases del motor hacia el exterior, teniendo la importancia de socorrer en la expulsión de los gases producidos tras la combustión en un motor de dichas características, y así obtener un mayor rendimiento y una mayor potencia tras la reacción, sin olvidar la reducción en algunos modelos de las emisiones nocivas hacia el medio ambiente.

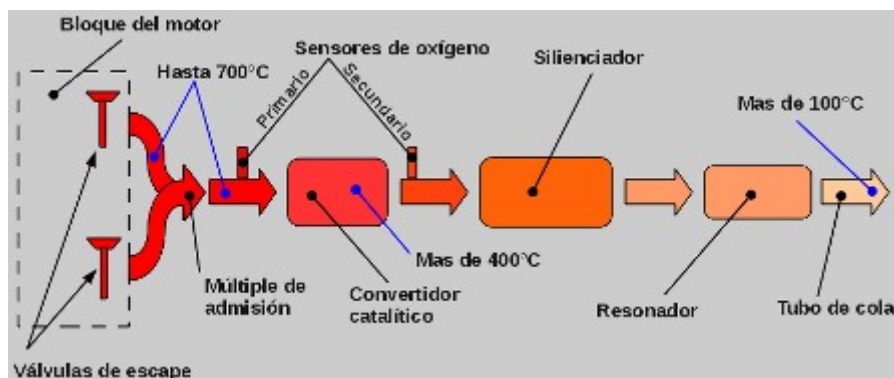


Figura 43: Esquema de un sistema de escape en un motor de combustión interna.

Fuente: www.sabelotodo.org

Consta de un múltiple escape, conductos, un catalizador, un silenciador y de sensores auxiliares para el control de la emisión de gases.

3.21.5.3.1.-Funcionamiento de los sistemas de escape.

El principio de operación, se basa en las leyes de la conducción de los gases a través de un sistema de tubos y por el estudio de las ondas generadas por el flujo alternativo. Los gases

producto de la combustión, son expulsados mediante el pistón en su carrera ascendente y pasa a través de la válvula de escape hacia el conducto colector. Seguido, el sistema puede derivar en uno o varios catalizadores, para así disminuir las emisiones de gases nocivos y a continuación, cruza el silenciador, el cual permite disminuir la emisión de ondas sonoras en el sistema. En el sistema, pueden existir uno o más sensores de diferente índole, en combinación con una unidad de control y actuadores que controlan los diferentes parámetros de la combustión.

Este mecanismo, funciona bien si el flujo de gases hacia el exterior es continuo, si es de caudal acorde al régimen de marcha del motor o con pérdidas de carga admisibles requeridas por el fabricante del motor. La calidad del combustible empleado, posee una gran importancia en los sistemas de catalizadores, ya que dependiendo de su composición, pueden ser contaminados.

El control principal a realizar, es la medición de la pérdida total de carga del flujo de gases, suma de las pérdidas parciales al atravesar cada componente del sistema, y además se ha de realizar un control en la calidad de los gases de escape, especialmente en aquellos sistemas que poseen un catalizador. (19)

3.21.5.3.2.-Principales fallos en un sistema de escape.

Los fallos más comunes en el sistema de escape, consisten en la obstrucción de los diferentes conductos, debido a las partículas carbonosas del conducto, producto de una combustión incompleta, la obstrucción o contaminación de un catalizador o debido a la rotura de algún sensor de medida y control.

3.21.5.3.3.-Mantenimiento sobre el sistema de escape.

Las reparaciones posibles a realizar, son fundamentalmente la limpieza de los conductos o el reemplazo de ciertos componentes, tales como los catalizadores al ser contaminados, el silenciador en caso de rotura, o algún sensor al proporcionar una señal defectuosa.

Las precauciones a tener en cuenta a la hora de trabajar en este sistema, se basan principalmente en la espera de su disminución de temperatura, ya que si las observaciones son realizadas con el motor en marcha, éstas deben de gozar de un lugar que posea una ventilación importante, debido a los efectos que poseen los gases nocivos ante nuestra salud. Para disminuir las emisiones de dichos gases hacia el medio ambiente, se debe emplear un control de los parámetros intervinientes en la combustión, y en el caso de los catalizadores, estos no deben encontrarse obstruidos ni contaminados. (18)

3.21.5.4.-Sistema mecánico de regulación de velocidad.

El sistema de regulación mecánica de velocidad, se caracteriza por ser el más empleado actualmente en los motores estacionarios, pudiendo ser también electrónicos. Se

trata de uno de los sistemas más importantes en un motor de combustión interna, ya que permite la regulación de marcha del mismo. Como principal función, ha de fijar las revoluciones del motor en el régimen deseado por el usuario.

3.21.5.4.1.-Funcionamiento del sistema mecánico de regulación de velocidad.

Consta de un eje de entrada, unos contrapesos móviles y un sistema de transmisión de movimiento por palancas, hasta la leva de accionamiento del carburador o bomba inyectora si se trata de un motor diesel. A continuación se analiza su funcionamiento:

En primer lugar, el eje de entrada toma el movimiento de rotación del motor mediante un sistema de engranajes o mediante una correa dentada, dependiendo del modelo automovilístico. A continuación, este desplazamiento es transmitido a un mecanismo de contrapesos que se deslizan debido a la acción de la fuerza centrífuga, el cual se transforma mediante un sistema de palancas en un movimiento de trayectoria lineal acortada. Finalmente, dicho movimiento es transmitido mediante palancas a una leva situada en el carburador o en la bomba inyectora, dependiendo del modelo. (19)

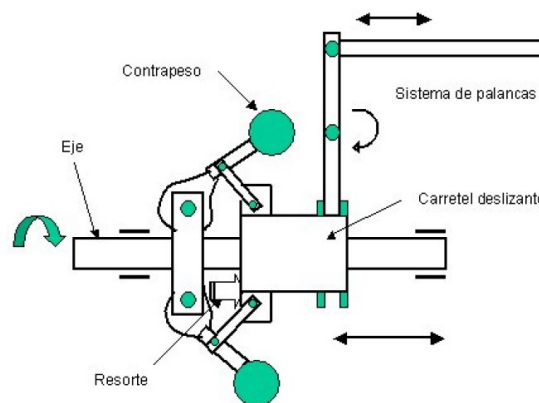


Figura 44: Esquema de un sistema de regulación mecánico de velocidad para motores de combustión interna.

Fuente: www.librería-nautica.com

3.21.5.4.2.-Principales problemas de un sistema mecánico de regulación de velocidad.

Los principales y más comunes problemas que pueden tener lugar, se deben a la obstrucción de las varillas que accionan la leva del carburador. Tratando sobre los problemas internos que pueden tener lugar, se observa el desajuste de los contrapesos, para lo cual se deben desarmar y proceder a su correcto ajuste, ya que puede dar lugar a la rotura de la carcasa del regulador, seguido de una rotura en cadena del sistema. (19)

3.21.5.4.3.-Mantenimiento sobre un sistema de regulación mecánica de velocidad.

Este sistema funciona correctamente si al quitarle carga al motor, este se desacelera lentamente y toma una velocidad acorde a la nueva carga impuesta. Para su correcto funcionamiento, se debe realizar un control dentro de su lubricación en las partes móviles y verificar que el sistema de palancas se encuentre libre de obstrucciones, ya que si el sistema no posee un correcto funcionamiento, éste no responderá bien ante una variación brusca en la carga del motor, produciendo daños sobre éste. Para evitar dicho suceso, se debe comprobar el funcionamiento periódicamente, observando su funcionamiento ante variaciones de carga.

Las precauciones de seguridad y mantenimiento a tener en cuenta cuando se tratan de mecanismos en movimiento, han de realizarse en estado de reposo evitando derrames de sustancias que puedan afectar al medio ambiente. (18)

Las reparaciones se deben realizar desarmando el sistema y reemplazando todas y cada una de las partes dañadas, con especial atención sobre los rodamientos, los cuales tienden periódicamente a fallar.

3.21.5.5.-Sistema de biela y manivela en un motor de combustión interna.

Se trata del principal sistema mecánico del motor, funcionando como interface entre la energía liberada tras la combustión del combustible y la energía mecánica resultante. Su importancia, radica en coordinar los diferentes movimientos producidos en el motor, para así obtener un trabajo útil en el eje de salida. Dicho mecanismo, transforma el movimiento rectilíneo alternativo del pistón en desplazamiento de rotación en el cigüeñal.

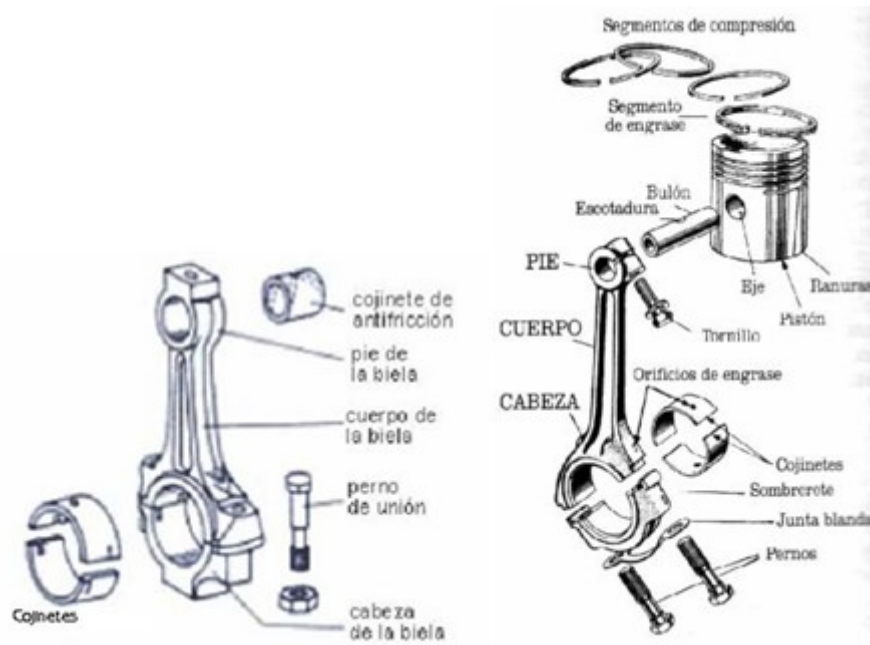


Figura 45: Elementos que componen un sistema de biela y manivela para un motor de combustión interna.

Fuente: www.multiserviciosgerarmotors.blogspot.com

3.21.5.5.1.-Funcionamiento del sistema biela-manivela.

Consta de un pistón articulado a una biela, la cual se encuentra conectada a su vez, a una manivela o cigüeñal. Las articulaciones son realizadas mediante bujes o cojinetes metálicos con propiedades de anti-fricción. Su funcionamiento consta de las siguientes pautas:

En un primer lugar, el pistón confinado a moverse en un recinto cerrado o camisa, genera un movimiento rectilíneo alternativo, mediante el cual inicialmente desciende debido a la acción de la presión que ejercen sobre él los gases de la combustión tras su expansión. Debido a su vinculación con una biela, ésta lo acompaña en su desplazamiento, pero a su vez, como la biela se encuentra enlazada con la manivela del cigüeñal, da lugar a una rotación. A continuación, el pistón asciende debido a la inercia, resultado de los contrapesos del cigüeñal, logrando una carrera completa, la cual es repetida, dando lugar al movimiento rotacional de éste, transmitiendo finalmente el movimiento hacia el exterior, donde se encuentra acoplado a un determinado mecanismo.

Este sistema, ha de funcionar sin inconveniente alguno, mientras se mantenga en un determinado régimen de revoluciones fijado y no se produzcan detenciones indeseadas. Por lo tanto, otros sistemas vinculados a este mecanismo tales como los sistemas de refrigeración y lubricación, han de responder con iguales condiciones, sin olvidar la correcta combustión en el interior del cilindro.

3.21.5.5.2.-Comunes fallos en un sistema de biela-manivela.

Si el mecanismo produce un funcionamiento irregular, pérdida de rendimiento, dificultad en su arranque, engrane del motor o una detención brusca, es posible que el mecanismo de biela-manivela se encuentre dañado, presentando un desgaste excesivo en los cojinetes de fricción. También se puede deber a una existencia de una interferencia fuera de rango entre el pistón y la camisa, debido a ciertos residuos carbonosos depositados, o a un excesivo calentamiento en el sistema, por la falta de lubricación y refrigeración. (19)

3.21.5.5.3.-Mantenimiento y seguridad ante un sistema de biela-manivela.

La reparación de este mecanismo, no es nada simple, ya que requiere del desmontaje de sus componentes, una revisión y un posterior control de dimensiones, tolerancias, alineaciones y paralelismo entre sus componentes. En general ha de verificarse si la biela no se encuentra torcida, si el eje del buje de biela y el del cojinete de fricción no han perdido paralelismo, o el estado de los metales anti-fricción en el muñón del cigüeñal, se encuentran en correcto estado.

Probablemente, la reparación consista además, en el reemplazo de ciertas piezas tales como el buje, el perno del pistón, los metales anti fricción, junto con la rectificación del muñón en el cigüeñal.

Respecto a la seguridad que las personas ante posibles altercados, se ha de tener en cuenta que el sistema consta fundamentalmente de elementos los cuales se encuentran en movimiento, por lo cual, solamente se ha de poder acceder a ellas con el motor totalmente detenido y en frío. A su vez, como bien se ha explicado, todos ellos necesitan de una lubricación para su correcto funcionamiento, por lo que se deben de extremar todas la precauciones a la hora de manipular el lubricante, evitando a su vez derramas, debido a sus altos grados de inflamabilidad. (18)

3.21.5.6.-Carburadores.

Dentro de los carburadores empleados actualmente, podemos encontrar tanto los que se emplean en combustibles líquidos como los empleados en combustibles gaseosos.

3.21.5.6.1.-Carburadores para combustibles líquidos.

Este dispositivo, realiza la conversión y mezcla del combustible líquido con el comburente, el aire, de acuerdo a los requerimientos específicos del motor.

Su importancia, radica en la producción de una determinada mezcla adecuada al régimen de marcha en el motor, tales como su arranque, ralentí, aceleración, velocidad crucero, desaceleración y carga máxima. La función principal, consiste en la mezcla del aire exterior con los vapores del combustible líquido, para así producir una apropiada combustión.

Es de hacer notar, la diferencia con el carburador para gas, ya que a este carburador, además se le agrega la función de evaporar el combustible líquido en una sección donde se produce una brusca caída de presión.

3.21.5.6.1.1.-Funcionamiento de un carburador de combustibles líquidos.

El dispositivo básico consta de una válvula mariposa, una cuba de nivel constante y uno o varios surtidores. Actualmente, los carburadores poseen una gran cantidad de accesorios para así optimizar su funcionamiento, adecuando de esta manera la mezcla al régimen requerido en cada momento por el motor. Con la tendencia actual en la inyección del combustible, los carburadores tienden a desaparecer. El funcionamiento básico de un carburador, consta de las siguientes etapas.

En un primer lugar, la mariposa del carburador se abre, dando lugar a una depresión que genera un flujo de aire que se acelera al pasar a través de un difusor o tubo de Venturi. Este aumento en la energía cinética del aire, produce una disminución de la presión en ese punto, en el cual se encuentra ubicada el surtidor de combustible líquido. A continuación, esta depresión evapora una cierta fracción de combustible, mezclándose con el aire que ingresa en el motor, funcionando de comburente. Finalmente, este descenso en el nivel de cuba, genera un movimiento en el flotante, que al bajar, abre la entrada de combustible, reponiendo nuevamente el nivel.

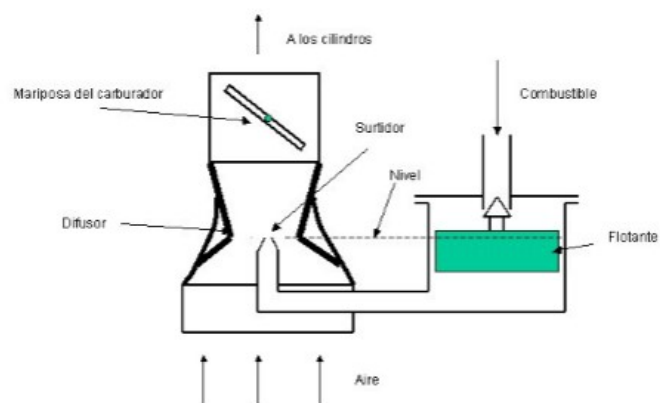


Figura 46: Esquema de un carburador para combustibles líquidos.

Fuente: www.autobirf.blogspot.com

El carburador, funciona bien si se produce en él la cantidad necesaria de mezcla de combustible, que el motor necesita para funcionar de acuerdo a su régimen de funcionamiento. Si esto sucede, el motor funcionará correctamente si ninguna interrupción, mientras que los gases de combustión tendrán una adecuada composición, asegurándonos una total combustión en la mezcla. (19)

3.21.5.6.1.2.-Fallos comunes en carburadores para combustibles líquidos.

Los fallo más comunes, se pueden detectar observando el funcionamiento mismo del motor, el cual ha de ser suave y sin interrupciones, junto con un resultado en el análisis de los gases de combustión, que son síntomas de la calidad o proporciones en el combustible y comburente. Otro importante indicador a tener en cuenta, es la temperatura que poseen los gases de escape. (18)

3.21.5.6.1.3.-Seguridad y mantenimiento de carburadores para líquidos.

Por otro lugar, los controles que han de realizarse para asegurar el suministro de aire y combustible, se basan en adecuar tanto la calidad como la cantidad necesarias y que todos los conductos, surtidores y orificios internos del mismo, se mantengan con sus calibraciones de fábrica.

La reparación de un carburador, se encuentra limitada al recambio de piezas que han sufrido desgaste con el uso, por lo que sería muy útil tener presente el calibre de todos los orificios y surtidores que se encuentran en el mismo.

Las consideraciones de seguridad, son las mismas que para cualquier sistema que posee y manipula combustible en su interior, es decir, purgar y eliminar toda traza de combustible antes de realizar cualquier reparación. Para el cuidado del medio ambiente, se requiere evitar derrames y disponer restos de combustible en recipientes adecuados para su posterior tratamiento. (18)

3.21.5.6.2.-Carburador para combustibles gaseosos.

Se trata de un dispositivo, que prepara la mezcla de aire (comburente) y gas combustible, antes de ser ingresada al motor, en cualquier régimen de funcionamiento. Es un elemento muy importante, ya que de su regulación y funcionamiento, dependen las condiciones a llevar a cabo en la combustión y por tanto, del funcionamiento y comportamiento del motor en sus diferentes regímenes de marcha.

Consta de varios componentes, tales como una membrana, un resorte, una válvula de pasaje de comburente, una válvula de mariposa, una válvula de medición de gas, una válvula de mezcla en ralentí y otra válvula de caudal o potencia.

3.21.5.6.2.1.-Funcionamiento de carburadores para combustibles gaseosos.

En su inicio, en el múltiple de admisión del motor se genera una depresión, la cual actúa sobre la cara superior de la membrana del carburador, que mediante la acción de la presión atmosférica actuando sobre la cara inferior, eleva la membrana, a su vez equilibrada por un resorte. En segundo lugar, al levantarse la membrana, deja abierto un pasaje de aire, abriendo la válvula de medición de gas, el cual ingresa al carburador, donde se produce la

mezcla con el aire en adecuadas proporciones. Mientras tanto, la válvula de mezcla en ralentí, regula el pasaje de aire cuando la mariposa del carburador se encuentra cerrada y la de caudal o potencia, reduce el pase del gas al mínimo. De esta forma, se obtiene una eficaz regulación de la calidad de la mezcla.

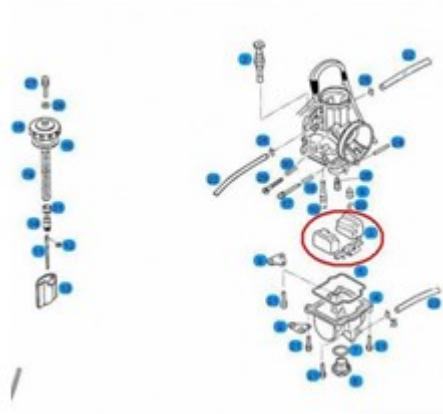


Figura 47: Desmonte de un carburador para combustibles gaseosos.

Fuente: www.motocrosscenter.com

A la hora de conocer el correcto funcionamiento de un carburador de gas, será nuevamente necesario un análisis de los gases de combustión, ya que una correcta reacción depende principalmente de las condiciones de aire y combustible que ingresan al motor, siendo proporciones exclusivas del carburador.

3.21.5.6.2.2.-Fallos que tiene lugar en un carburador para gases.

Los principales fallos, se pueden detectar observando el funcionamiento de dicho motor, el cual ha de ser suave y no dar lugar a interrupciones. A su vez, tras el resultado en un análisis de los gases de combustión, se obtiene la cantidad y calidad de la fracción combustible/comburente., sin olvidar la importancia de la temperatura como otro indicador a tener en cuenta. (19)

Uno de los principales problemas, que se pueden encontrar, se trata de una rotura en la membrana del carburador, el cual ha de solucionarse mediante un reemplazo de dicha pieza, al igual que en el resto de componentes.

3.21.5.6.2.3.-Seguridad y mantenimiento en carburadores para gases.

Fundamentalmente, para su funcionamiento se deben asegurar unos adecuados suministros en el gas combustible y en el comburente, mediante las condiciones especificadas por el fabricante.

Debido a la producción de mezclas explosivas en el interior del carburador, su manipulación ha de realizarse mediante un aislamiento contra la fuente de suministro de gas

combustible, ventilando el posible gas que pudiera quedar retenido en su interior. Finalmente, se deben de evitar posibles pérdidas que den lugar a la contaminación del medio ambiente. (18)

3.21.5.7.-Alimentador de combustibles gaseosos.

Un sistema de alimentación de combustible gaseoso, se trata de una instalación que adecua la provisión de gas a las necesidades y especificaciones de un motor de gas. Es de vital importancia para el correcto funcionamiento del motor, la eliminación de fluidos en estado líquido, asegurar la presión adecuada para su alimentación y la eliminación de impurezas sólidas que pueden ser arrastradas mediante el gas.

Este sistema, toma el gas provisto por la red de distribución, separa los compuestos que llegan en estado líquido y regula la presión de línea a una adecuada para la alimentación del regulador en el motor.

3.21.5.7.1.-Elementos que intervienen en la alimentación de combustibles gaseosos.

Para dicha operación, consta de un separador gas/líquido, de un regulador de gas y de un filtro. A su vez, el separador de líquido, consta simplemente de un recipiente cilíndrico con placas en su interior, en el cual choca el gas de entrada reteniendo las gotas del líquido que arrastra dicho gas y depositándolas en su interior. Esta operación, es favorecida tras un aumento en el tiempo de residencia del fluido e introduciendo cambios en la dirección del flujo. La separación del líquido, es realizada por expansión y mediante cambios de dirección en el flujo, en un recipiente, para así disminuir la energía cinética del fluido al chocar con las placas en su recorrido, dejando al gas bajo la acción gravitatoria el mayor tiempo posible. Este camino tortuoso junto con el tiempo de residencia, hacen que las gotas líquidas sean retenidas en estas placas, decantando por la acción de la gravedad. La purga del líquido separado, fluye por la parte inferior, pudiendo ser de forma manual o por el contrario, automática mediante un mecanismo computacional de control.

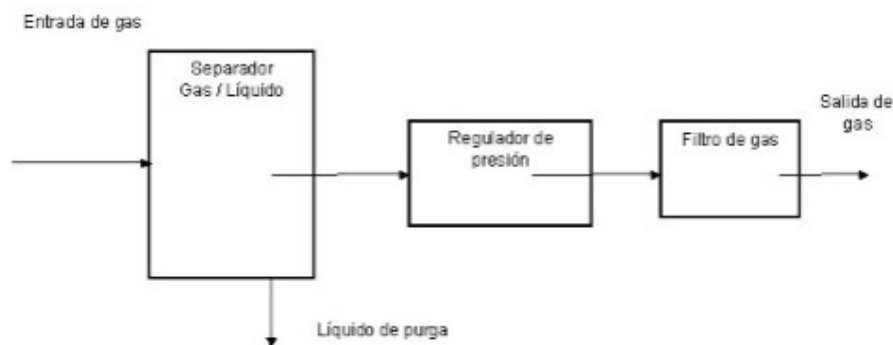


Figura 48: Esquema de los procesos de alimentación en combustibles gaseosos.

Fuente: www.mailxmail.com

En otro lugar, el regulador de gas consta de una membrana expuesta por un lado, a una presión de referencia, generalmente la atmosférica, y a la acción de un resorte cuya tensión puede ser ajustada desde el exterior, mediante el giro de un tapón roscado. Por otro lado, se expone a una presión superior aguas arriba, a través de un orificio. El gas, cuya presión se quiere regular, ingresa por un orificio calibrado, acorde al caudal que va a proporcionar, y sobre el que actúa un obturador conectado por una palanca a la membrana. (18)

El funcionamiento del regulador de presión, puede resumirse en las siguientes pautas. En un primer lugar, si la presión del gas aguas arriba se incrementa, ésta se transmite mediante un orificio hacia la membrana, ejerciendo un empuje hacia arriba. Debido a esta acción, a través de un sistema de palanca, el obturador cierra el paso del gas, con lo cual la presión del gas sufre una disminución, mientras que la presión del resorte sobre la membrana, reacciona empujándola hacia su zona inferior, restituyendo el equilibrio y abriendo nuevamente el orificio. Con estas condiciones, la presión del gas se mantiene constante. En un segundo lugar, el regulador mediante el empleo de un sistema mecánico de membrana, resorte antagónico y obturador, mantiene, aumenta o reduce la presión de entrada, acondicionándola a la requerida por el carburador. Si la presión de alimentación es muy elevada, se han de emplear dos reguladores de presión de diferente rango, conectados en serie según la aplicación, antes de ingresar en el carburador.

Este sistema es muy adecuado, si el gas a la salida del mismo, no presenta el arrastre de líquido y posee la presión requerida para el siguiente paso.

Para poner en régimen a este sistema, debe asegurarse la apertura de la válvula de ingreso del gas, que el separador del líquido se encuentre correctamente purgado y que el regulador de gas se encuentre regulado a la presión de salida a requerir.

Si por el contrario el sistema no funciona correctamente, ha de verificarse a la salida del separador un gas húmedo con fuerte arrastre de líquido, o al tomar la presión a la salida del regulador, su valor se posiciona fuera del rango especificado por el mismo.

Para poder eliminar el líquido introducido en el sistema, se debe purgar el mismo, drenando todos los fluidos que han sido acumulados en el fondo del separador. (19)

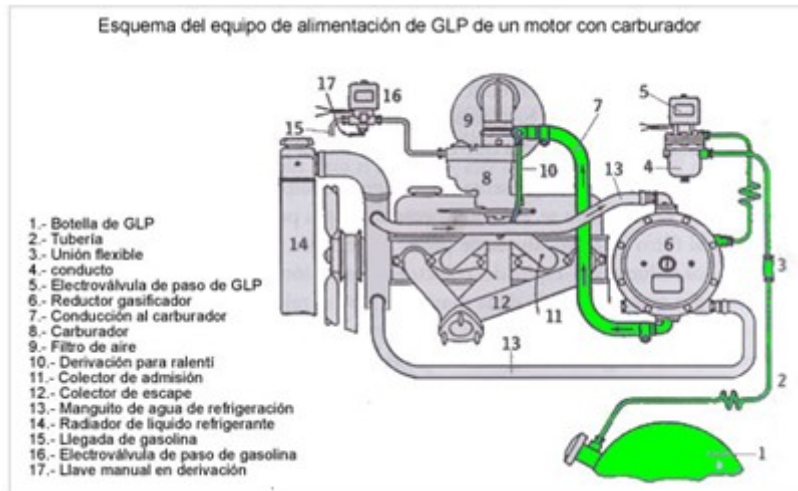


Figura 49: esquema de un equipo de alimentación de gas licuado del petróleo empleado en un motor con carburador en el modelo automovilístico Golf BI FUEL.

Fuente: www.ro-des.com

En otro ámbito, la regulación de la presión sobre el gas, se realiza ajustando la presión deseada sobre los reguladores, mediante la colocación de un manómetro a la salida, para así poder realizar una lectura continua. A su vez, se regula la presión ajustando la tensión del resorte que actúa sobre la membrana.

3.21.5.7.2.-Seguridad y mantenimiento ante posibles fallos en un sistema de alimentación de combustible gaseoso.

Uno de los fallos más frecuentes en los reguladores de presión, es la rotura de su membrana, la cual ha de ser reemplazada en estos casos.

Las precauciones de seguridad se deben extremar, ya que el sistema contiene un combustible, por lo que a la hora de realizar cualquier trabajo en alguno de sus componentes, de debe aislar la fuente de provisión de gas, ventear la presión de gas en su interior y drenar los líquidos acumulados. Además, por ninguna causa, han de realizarse las labores a elevadas temperaturas en cualquier parte del circuito, debido a su alta peligrosidad. En cuanto al ambiente, tendremos cuidado en recolectar todos y cada uno de los drenajes de líquido y tratar de que los gases ventilados, sean recirculados a otros circuitos de tratamiento de gas. (18)

3.21.5.8.-Alimentador de combustible líquido en motores de combustión interna.

El sistema de alimentación de un combustible líquido, se trata de una instalación que acomoda la provisión de nafta o gasoil a las necesidades y especificaciones del sistema de inyección o del carburador del motor.

Es de vital importancia para el correcto funcionamiento del motor, debido a su bombeo sobre el combustible cargado, en el depósito o tanque de combustible, hasta la bomba de inyección propiamente dicha en los motores Diesel, o hasta los inyectores en la inyección electrónica de gasolina. Por lo tanto, da lugar a una regulación en la presión de alimentación, reteniendo las impurezas sólidas que pueden arrastrar.

3.21.5.8.1.-Funcionamiento de un sistema de alimentación de combustibles líquidos para un motor de combustión interna.

Este sistema, mediante una bomba ubicada en el interior o en el exterior del depósito de combustible, envía a éste con una presión regulada, pasando a través de un filtro que retiene las partículas sólidas que pudiera contener dicho líquido, hasta una segunda bomba de mayor presión de salida, en los motores Diesel o hasta los inyectores propiamente dichos, en la inyección electrónica de combustible.

El presente mecanismo, consta de una bomba centrífuga, sus engranajes, el diafragma, la leva, el émbolo o lobular, un regulador de presión, un conducto de circulación y un filtro.

En un primer lugar, el sistema toma el combustible líquido desde su depósito, el cual es circulado mediante la bomba a través de un conducto que lo introduce en un filtro. Este último elemento, retiene las partículas sólidas en suspensión, para luego alimentar otro sistema. Previamente, ha de haberse regulado la presión.

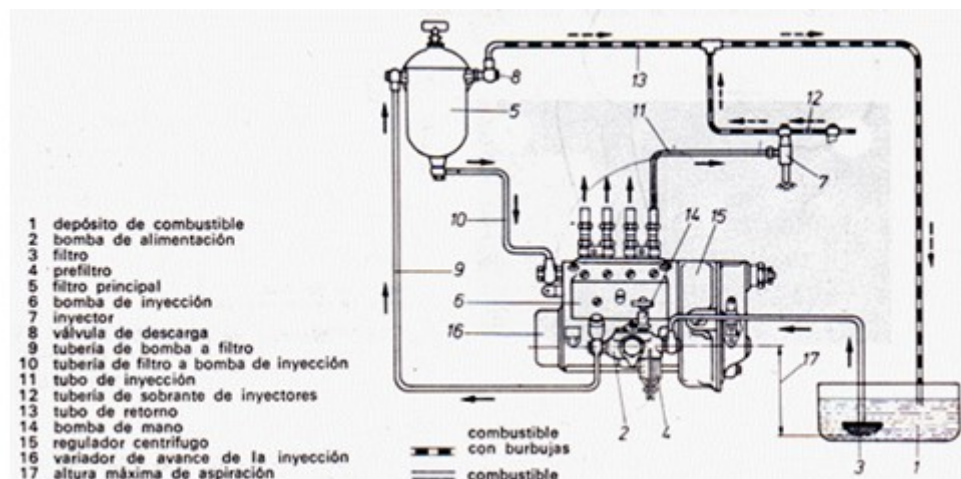


Figura 50: Esquema de un sistema de alimentación de combustibles líquidos.

Fuente: www.machineryspaces.com

Su correcto funcionamiento, se basa en un limpio suministro del combustible, sin interrupciones y sin variaciones de presión, lo cual se puede verificar mediante un manómetro colocado en la línea de conducción. Para poder mantenerlo en buenas condiciones, se han de seguir dos precauciones fundamentales. La primera consiste en mantener un cierto nivel en el

depósito de combustible, evitando así que se encuentre vacío completamente, mientras que la otra, consiste en el recambio periódico del filtro, siguiendo la frecuencia indicada por el fabricante.

3.21.5.8.2.-Seguridad y mantenimiento en un sistema de alimentación de combustibles en estado líquido.

La detección de un fallo en el sistema, se determina mediante la medición de su presión, o de forma visual, debido a la ausencia de combustible en el sistema de alimentación. Si por alguna razón el sistema falla, se ha de observar que el filtro no se encuentre obstruido, que no haya fugas en los conductos de circulación y finalmente, que funcione correctamente la bomba. (18)

Respecto a las condiciones de seguridad, éstas han de extremarse, ya que el sistema manipula un combustible, por lo que para realizar cualquier manipulación, ha de purgarse previamente todo el combustible. Además, no ha de olvidarse que las operaciones deben realizarse a temperatura ambiente, para evitar la formación de gases, producto de la evaporación del combustible. Por último, en cuanto al ambiente, se deben recolectar todos y cada uno de los drenajes generados, para a posterior disponerlos adecuadamente. (19)

3.21.5.9.-Alimentación de aire comburente, en un motor de combustión interna.

Es sistema a estudiar a continuación, adecua el suministro necesario de comburente para la combustión, en cuanto a cantidad, ya que posee una suma importancia para el funcionamiento y la vida útil del motor. El aire, ha de ser suministrado en cantidades necesarias, reteniendo posibles partículas que contiene dicho gas en suspensión.

Para ello, toma aire del medio ambiente, a continuación separa las impurezas en estado sólido y lo conduce hasta el múltiple de admisión o hasta el carburador.

3.21.5.9.1.-Elementos que intervienen en un sistema de alimentación del comburente.

Consta principalmente de un filtro, el cual puede ser seco o húmedo y un conducto de circulación. Además, puede contener adosado un compresor o un sobrealimentador, controlados mediante sensores automatizados. El filtro de aire, mediante la composición de un conjunto de laberintos de papel metalizado, retiene las partículas sólidas contenidas en el aire de ingreso, el cual es introducido a continuación en el interior de un conducto que lo deriva hacia el sobrealimentador, al múltiple de admisión o a un carburador.



Figura 51: Descomposición de los componentes que forman un sistema de alimentación de comburente, en un motor de combustión interna.

Fuente: www.filtrosad.com.ar

Este sistema, posee un correcto funcionamiento, siempre y cuando, los productos de la combustión presenten un porcentaje nominal de gases, que nos indique una buena combustión, es decir, con la proporción de aire correspondiente. Otro importante indicador, es la temperatura que poseen los gases de escape. A la hora de determinar los gases de combustión, se emplea un analizador de gases. (18)

3.21.5.9.2.-Control y mantenimiento en un sistema de alimentación del comburente.

Para controlar su correcto funcionamiento, se debe controlar periódicamente el filtro de aire, mientras que la frecuencia de inspección dependerá principalmente de las horas de funcionamiento y del medio donde se encuentre instalado el motor. Para ello, se pueden realizar distintas mediciones, tales como el análisis de los gases de escape o su visualización. Por otro lado, ya que el fallo más común es la obstrucción del filtro, en la gran mayoría de las ocasiones, bastará con observar al mismo y verificar su estado, por lo que a lo general, los principales inconvenientes en este sistema se resuelven reemplazando dicho elemento filtrante. (19)

Finalmente, como se puede observar, la manipulación de estos sistemas posee un bajo riesgo, ya que únicamente hay que tener la precaución de que el motor no se encuentre en marcha, mientras que de acuerdo al medio ambiente, se deberá disponer a los cartuchos y a los desperdicios del filtro, en un lugar adecuado.

3.21.5.10.-Sistema mecánico de inyección de combustible en los motores de combustión interna de ignición por compresión.

El sistema a estudiar a continuación, de inyección para combustibles líquidos, empleado comúnmente en los motores Diesel convencionales, se trata de un mecanismo de inyección a alta presión, en el orden de 200kg/cm². (16)

Se utiliza para la inyección, de acuerdo a la secuencia de encendido de un motor, cierta cantidad de combustible a alta presión y finalmente pulverizado, en el ciclo de compresión del motor. Éste, al entrar en contacto con el aire a altas temperaturas, se enciende dando lugar a la combustión.

Su función consiste en la producción de la inyección de combustible líquido finamente pulverizado, en el momento y cantidad adecuados, de acuerdo al régimen de funcionamiento del motor.

El mecanismo, consta fundamentalmente de una bomba de desplazamiento positivo con capacidad de inyección de cantidades variables de combustible, dadas por un diseño de émbolos y por un cilindro. El otro componente importante, se trata del inyector, el cual inyecta el combustible directamente en la cámara de combustión, o de forma indirecta mediante otra cámara auxiliar.

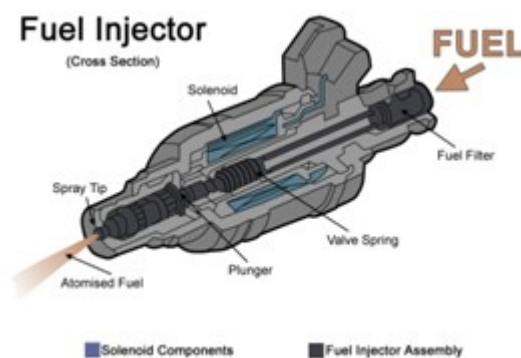


Figura 52: Sección de un inyector en un sistema mecánico de inyección para los motores Diesel.

Fuente: www.esacademic.com

3.21.5.10.1.-Funcionamiento de un sistema mecánico de inyección de combustible en los motores Diesel.

En un primer lugar, el sistema de alimentación, suministra el combustible a una bomba alternativa accionada por el mismo motor, al estar ambos sincronizados. A continuación, para inyectar el combustible en cada cilindro en el momento preciso, la bomba, mediante un conjunto de émbolos de estructura y mecanismo particular, accionados por un sistema de levas, bombea el combustible a través de una cañería hasta los inyectores. Dichos componentes, empleando el pulso de presión del fluido, abren e inyectan el combustible, finamente pulverizado, en el interior de la cámara de combustión. La cantidad de combustible a inyectar por cada émbolo, se regula mediante la rotación del émbolo por medio de un sistema de piñón y cremallera. De esta forma, se logra poner en comunicación la cámara donde se encuentra el combustible ingresado, con una ranura helicoidal mecanizada en el émbolo, dejando salir el excedente de combustible de regreso a su depósito original, limitando así la cantidad inyectada al motor. (16)

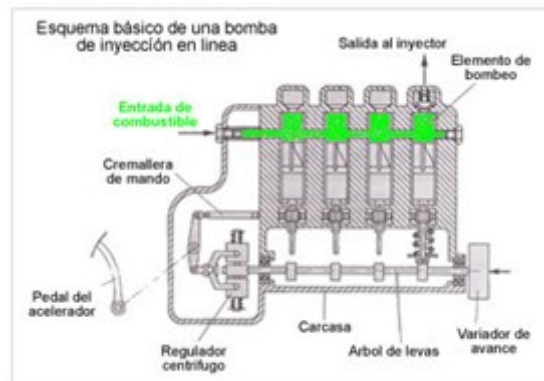


Figura 53: Esquema básico de un sistema de inyección mecánico para motores Diesel.

Fuente: www.esacademic.com

Todo este proceso, funciona correctamente si la cantidad de combustible inyectado en el momento preciso de compresión del cilindro, es la adecuada. Nuevamente, si se realiza un análisis en la composición de los gases de combustión y en la temperatura de los gases de escape, se obtiene una indicación del modo en el cual se está realizando la reacción. Cualitativamente, un funcionamiento sereno y sin interrupciones, junto con gases de combustión en adecuadas condiciones, es indicador de un correcto funcionamiento en los sistemas de inyección. A su vez, la bomba debe de estar perfectamente sincronizada, como se comentó anteriormente, con el respectivo motor, para asegurar una inyección correspondiente a la secuencia de inyección predeterminada.

3.21.5.10.2.-Principales fallos generados en un sistema mecánico de inyección de combustible en los motores Diesel.

Los principales fallos dentro de este mecanismo, se pueden precisar con una alta precisión mediante un análisis de los gases de combustión, o de forma cualitativa mediante la visualización de la cantidad y calidad de los gases de escape. Otros factores como el ruido, pueden ser síntomas de obstrucciones en los inyectores o ingresos inadecuados de aire en el interior del circuito. (19)

3.21.5.10.3.-Mantenimiento y seguridad en un sistema mecánico de inyección de combustible en los motores de combustión interna de ignición por compresión.

Para asegurar que el filtro de aire y de combustible, estén en buenas condiciones, se deben realizar controles basados en el ingreso del comburente en el múltiple de admisión y del combustible en la bomba de inyección, en cantidad y calidad específicas. A su vez, la bomba de inyección ha de poseer todos sus componentes dentro de su rango estipulado de ajuste, ya que por el contrario, se obtienen bajos rendimientos al no introducirse la cantidad de combustible especificada, a su determinada presión. Por lo tanto, dicha bomba ha de estar correctamente sincronizada con el funcionamiento del motor, para así iniciar la inyección en el

momento preciso y en el cilindro correspondiente. No se ha de olvidar calibrar los inyectores, encargados de realizar su apertura a la presión indicada, siendo la calidad y composición del combustible empleado, el factor principal a tener en cuenta para el buen mantenimiento de la bomba. (18)

La reparación de este sistema, debe realizarse por parte de un personal cualificado, debido a que los componentes de una bomba de inyección y de los inyectores son de gran precisión, y actualmente se encuentran sincronizados por equipos computacionales y autómatas programables.

A su vez, las precauciones al trabajar sobre este mecanismo, se encuentran basadas en la no generación de puntos calientes y en el drenado del combustible, para así evitar posibles accidentes. En cuanto al cuidado del medio ambiente, se han de elevar las precauciones mediante aislamiento del medio, ya que pueden dar lugar a importantes derrames de sustancias contaminantes.

3.21.5.11.-Sistema de encendido en motores de combustión interna de encendido por chispa.

Se trata de un sistema que proporciona la energía eléctrica necesaria para generar el encendido de la mezcla combustible/comburente. Su importancia radica en la garantía del inicio de la combustión en los motores que funcionan bajo el principio del ciclo Otto, dando lugar a una chispa que da lugar a la ignición de la mezcla.

Su función principal consiste en la conversión de la energía eléctrica de baja tensión en alta tensión, para a continuación distribuirla a cada uno de los cilindros del motor.

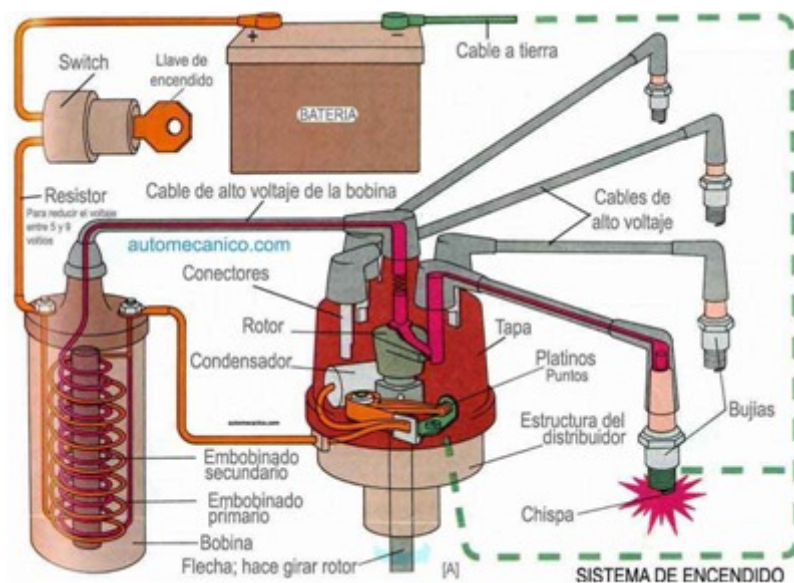


Figura 54: Esquema de encendido en motores de combustión interna.

Fuente: www.automecanico.com

Consta básicamente de un generador de corriente o batería, un arrollamiento primario, un interruptor mecánico, un condensador, un arrollamiento secundario, un distribuidor y las bujías.

3.21.5.11.1.-Funcionamiento de un sistema de encendido en motores de combustión interna.

En un primer lugar, el generador de corriente o una batería eléctrica, suministra energía eléctrica que circula a través de un interruptor mecánico y un condensador, hacia el circuito primario de la bobina. A continuación, se abre el interruptor, por lo que se produce una rápida variación en el campo magnético, sostenida por el condensador, el cual genera el paso de la corriente a través de un arrollamiento primario, dando lugar a una inducción elevada en el arrollamiento secundario, en torno a 14-20kV. Esta tensión, se distribuye al cilindro correspondiente de acuerdo a la secuencia de encendido, generando en los extremos de la bujía un chispazo, encargada de la ignición de la mezcla de combustible y comburente.

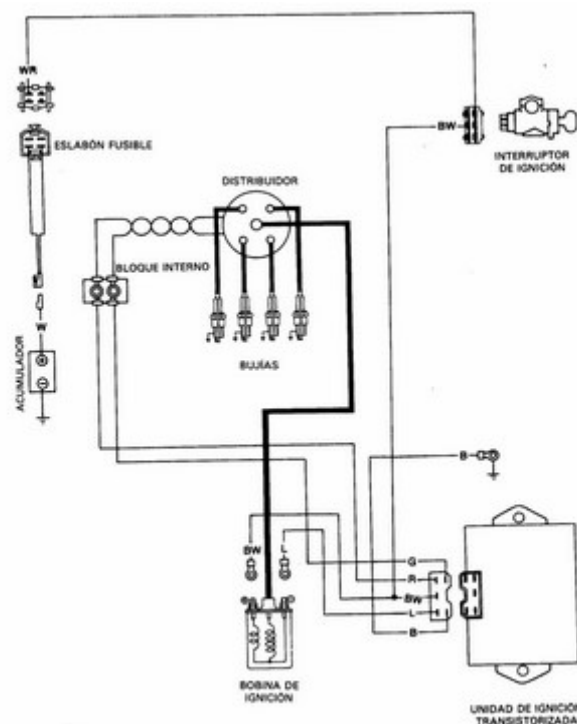


Figura 55: Plano de encendido de un motor de combustión interna de gasolina, en modelos Nissan.

Fuente: www.automecanico.com

Su funcionamiento, se puede verificar si el motor opera uniformemente y sin interrupciones. Para asegurar el correcto funcionamiento de sus componentes, se realizan mediciones eléctricas de continuidad, por lo que si esta existe no deberían de existir

problemas. El componente más dificultoso de inspeccionar es la bujía, debido a que puede no presentar fallos al ser probada en condiciones diferentes a las de su funcionamiento convencional. (15)

3.21.5.11.2.-Fallos más frecuentes en un sistema de encendido para motores de combustión interna.

Los fallos más frecuentes, se tratan de la rotura o la pérdida de aislamiento en la bujía, manifestándose mediante un funcionamiento irregular a un determinado régimen de marcha o en todo su régimen. Si se da la existencia de discontinuidad eléctrica en alguno de sus arrollamientos o en el cable de la bujía, no se daría lugar al encendido de la mezcla en el cilindro. A su vez, si la fuente de energía eléctrica inicial produce fallos, se observa una falta de registro de tensión en sus bornes de salida. (19)

3.21.5.11.3.-Seguridad y mantenimiento en un sistema de encendido de un motor de combustión interna.

La función más óptima para comprobar su correcto funcionamiento, consiste en observar que la bujía recibe alta tensión, debiéndose verificar esta última por separado mediante dispositivos electrónicos. También se ha de comprobar el suministro de baja tensión, es decir el sistema de baterías o el generador.

La reparación del sistema se encuentra limitado en el remplazo del componente el cual presente síntomas de incorrecto funcionamiento. En cuanto a las condiciones de seguridad, se deben tomar los mismos requisitos que en cualquier otra instalación eléctrica, con especial atención en el circuito de alta tensión. (18)

Finalmente, el cuidado del medio ambiente, se limita exclusivamente a la disposición adecuada de los elementos reemplazados.

3.21.5.12.-Sistema de encendido por magneto.

Este sistema de encendido de descarga capacitiva, se caracteriza por su alto grado de compactación, ya que posee el generador de energía eléctrica y el distribuidor incorporados. Su importancia radica en que además de su cumplimiento como sistema de encendido convencional, puede ser empleado en lugares en los cuales no se cuenta con una fuente de energía eléctrica externa, ya que éste por sí mismo, genera la energía a necesitar para su funcionamiento.

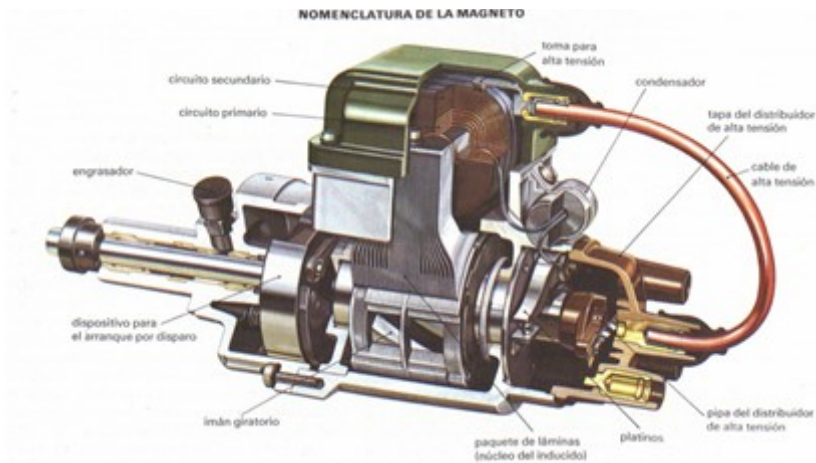


Figura 56: Sistema de encendido por magneto.

Fuente: www.diccionario.motorgiga.com

Su función principal, consiste en la conversión de la energía eléctrica de baja tensión, en energía eléctrica de alta tensión, al igual que en un mecanismo convencional, para continuación distribuirla a cada uno de los cilindros que componen el motor. Sin embargo, este novedoso sistema, posee la ventaja de proveerse a sí mismo la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento.

3.21.5.12.1.-Funcionamiento de un sistema de encendido por magneto.

Se encuentra compuesta por los siguientes elementos (19):

Tabla 2: Elementos que componen un sistema de encendido por magneto.

1.	Generador de corriente alterna incorporado.
2.	Circuito de rectificación sobre la corriente generada.
3.	Capacitor que almacena la energía eléctrica generada.
4.	Circuito de señalización de disparo en cada arrollamiento primario.
5.	Llave electrónica de disparo.
6.	Arrollamiento primario.
7.	Arrollamiento secundario.
8.	Bujías.

En un primer momento, el generador produce energía eléctrica a partir de la energía mecánica suministrada por el mismo motor. A continuación, ésta es rectificada mediante el circuito electrónico y almacenada en un capacitor. Una vez generada la señal de disparo, que es provista por un circuito eléctrico de bobinas captoras, dependiendo de la secuencia de encendido en el motor, la llave electrónica dispara la carga del capacitor sobre un arrollamiento primario. Seguido, la variación magnética de dicho arrollamiento, induce una

corriente de alta tensión sobre el arrollamiento secundario, la cual es conducida hasta la correspondiente bujía, la cual encenderá la mezcla de combustible/comburente.

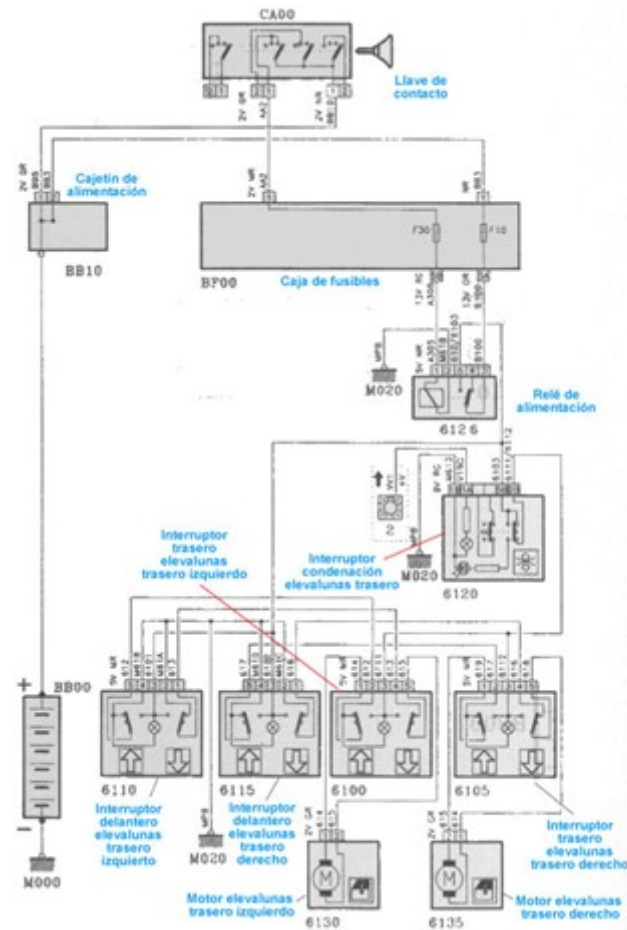


Figura 57: Plano de encendido por magneto en un motor de combustión interna.

Fuente: www.hdwalls.xyz

Su funcionamiento, se ha de verificar comprobando el funcionamiento uniforme del motor, mediante mediciones eléctricas que aseguran a la salida del dispositivo generador y sincronizador, la corriente de baja tensión estipulada por el fabricante, en su secuencia requerida. El componente más complicado de inspeccionar, es la bujía, que no suele presentar inconvenientes al ser probada en condiciones diferentes.

3.21.5.12.2.-Fallos más comunes en un sistema de encendido por magneto.

Los fallos más comunes, consisten en la rotura o pérdida de aislamiento de dicha bujía, manifestándose por un funcionamiento irregular, en los diferentes regímenes de marcha en el motor. Si aparece la existencia de una discontinuidad eléctrica en alguno de los arrollamientos o cables de la bujía, no se generaría la ignición de la mezcla en su respectivo cilindro. La

inspección ha de realizarse por cierto personal cualificado, debido a la intervención de mecanismos electrónicos y autómatas programables. (19)

3.21.5.12.3.-Seguridad y mantenimiento en un sistema de encendido por magneto.

La manera más óptima para realizar el control sobre el sistema, consiste en comprobar la llegada de energía eléctrica de alta tensión a la bujía, debiéndose verificar esta última de manera separada, mediante dispositivos específicos de control y mantenimiento, especificados por el fabricante.

En cuanto a la reparación del sistema, al igual que en los sistemas de encendido convencionales, consiste en la limitación de verificar el sincronismo de encendido y el replazo de los componentes dañados. (18)

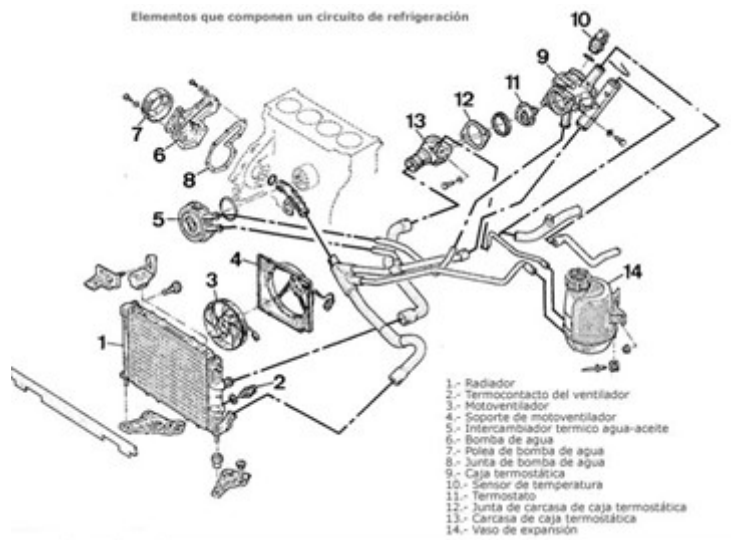
Las condiciones de seguridad empleadas, son las respectivas a los sistemas de seguridad empleados en instalaciones eléctricas, con especial atención el circuito de alta tensión, sin olvidar que posee de sistemas en movimiento. Por último, para el cuidado medioambiental, se han de disponer adecuadamente los elementos que hayan sido reemplazados.

3.21.5.13.-Sistema de refrigeración.

Este sistema trata de eliminar el exceso de calor generado en el motor, siendo de suma importancia ya que en caso de fallo, puede dar lugar a un alto riesgo en la integridad del motor.

Su principal función, consiste en extraer el calor generado en el motor, para así mantenerlo con una temperatura de funcionamiento constante, ya que un motor por debajo o por encima de su temperatura de funcionamiento, dará lugar a fallos en su funcionamiento.

Consta principalmente de una bomba de circulación, a pesar de que algunos sistemas no lo llevan incorporado, un fluido refrigerante, por lo general agua junto con aditivos químicos para optimizar sus propiedades, denominado líquido refrigerante; uno o más termostatos; un radiador o un intercambiador de calor, dependiendo del modelo y un ventilador de circulación de aire con sus respectivos conductos rígidos y flexibles, con el fin de efectuar las conexiones entre los componentes.



- **Figura 58:** Elementos que componen un sistema de refrigeración en motores de combustión interna.

Fuente: www.aficionadosalamecanica.com

3.21.5.13.1.-Funcionamiento de un sistema de refrigeración.

En la mayoría de los sistemas de refrigeración, la bomba de circulación toma el refrigerante del radiador, el cual repone su nivel de depósito auxiliar, impulsándolo hacia el interior del motor, de tal forma que proporciona una refrigeración de todas aquellas partes que se encuentran más expuestas a las altas temperaturas. Seguido, cruza a través de uno o varios termostatos, regresando al radiador donde se enfría al circular por tubos pequeños de gran superficie de disipación. El intercambio de calor, generalmente es realizado mediante el aire circundante, el cual es forzado a través del radiador, con el uso de un radiador, generalmente accionado por el mismo motor.

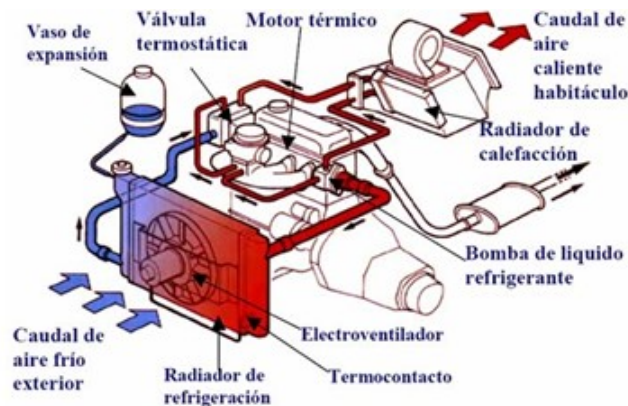


Figura 59: Esquema de refrigeración mediante líquido refrigerante en un motor de combustión interna.

Fuente: www.gopixpic.com

A su vez, existen sistemas de refrigeración donde el fluido activo es el aire circundante, forzado por las partes del motor que se quieren refrigerar. Estos sistemas, generalmente utilizan un circuito auxiliar con otro fluido activo, por ejemplo el aceite del motor, el cual consta de un segundo radiador que intercambia calor con el aire exterior y refrigera aquellas partes internas del motor, donde es complicado introducir otro tipo de fluido refrigerante. (18)

3.21.5.13.2.-Principales fallos en un sistema de refrigeración.

Los fallos más comunes, se observan precozmente, al comprobar los indicadores de temperatura en caso de incrementos inusuales de ésta, por lo que es aconsejable la instalación de aislantes y contactos que detengan el motor en caso de elevadas temperaturas. Otro punto importante a tener en cuenta, es la instalación de indicadores en el nivel de refrigerante, ya que previene de importantes fallos en el sistema. (19)

3.21.5.13.3.-Seguridad y mantenimiento en un sistema de refrigeración.

Para la verificación de su correcto funcionamiento, los motores disponen de uno o varios termómetros que nos indican en cada momento, la temperatura del refrigerante en la parte del motor que se desea medir. Dicha temperatura obtenida por los termómetros, deben encontrarse dentro de un rango de temperaturas aceptado por el fabricante, para las condiciones del funcionamiento del motor. Si se localizan temperaturas anormales, pueden indicar un fallo en el sistema refrigerante, o en el motor.

El correcto funcionamiento de este mecanismo, implica un control periódico sobre el nivel del fluido refrigerante; controlar que los termostatos se abran a la temperatura indicada por el fabricante; que el radiador se encuentre libre de posibles obstrucciones; que el fluido refrigerante posea una proporción correcta de anticongelante de acuerdo al clima de la zona y que el accionamiento de la bomba de circulación se encuentre en un correcto estado. (18)

El mantenimiento, puede abarcar desde el relleno del fluido refrigerante hasta la limpieza externa del radiador, pasando por el reemplazo de sus componentes dañados. Para ello, se deben de seguir una serie de precauciones y medidas de seguridad, basadas principalmente en trabajar con el motor totalmente apagado y evitando elevadas temperaturas sobre éste. Por otro lado, en el cuidado del medio ambiente, debe disponerse adecuadamente el fluido refrigerante al ser reemplazado, evitando a su vez derrames que puedan ser peligrosos y contaminantes.

3.21.5.13.4.-Fluidos refrigerantes convencionales.

Los fluidos refrigerantes convencionales, se encuentran compuestos a base de alcoholes, especialmente los glicoles, que mezclados con agua en diferentes proporciones, protegen al sistema de refrigeración y al motor, de daños por congelamiento, especialmente cuando trabaja en regiones de baja temperatura. Según la proporción del fluido anticongelante en el agua, variará el punto de congelación de la mezcla, debiéndose adecuar la misma a cada región de trabajo.

3.21.5.14.-Transmisión de la potencia, tomas de fuerza.

Se trata de un sistema intermediario entre el motor y la máquina o aplicación a accionar, de forma que acopla y desacopla el movimiento de rotación del motor al mecanismo o aplicación que se desea accionar.

Su principal función, por lo tanto, consiste en adquirir el movimiento rotacional del volante inercial, para a continuación transmitirla a través de una serie de discos dentados giratorios y platos, a un eje de salida donde se encuentra instalada la máquina o carga. Para ello, consta de una corona dentada, fija en el volante inercial, de unos discos dentados intercambiables de fibra y acero, que a su vez, se acoplan a la corona de arrastre. También lo componen una serie de discos metálicos, tanto fijos como deslizantes, un dispositivo de empuje con su accionamiento y un eje de salida montado sobre rodamientos en una carcasa metálica.

3.21.5.14.1.-Funcionamiento del mecanismo de transmisión de potencia.

El principio de funcionamiento, está basado fundamentalmente en la acción del freno o del embrague que ejercen los discos en movimiento sobre los platos fijos y deslizantes, cuando éstos se juntan entre sí, accionados por un sistema de palancas y resortes que mantienen una determinada presión entre sí. De esta forma, se evita el proceso de deslizamiento. Finalmente, transmiten el movimiento al eje de salida solidario, mediante los discos deslizantes, y éste, al mecanismo o dispositivo a conducir.

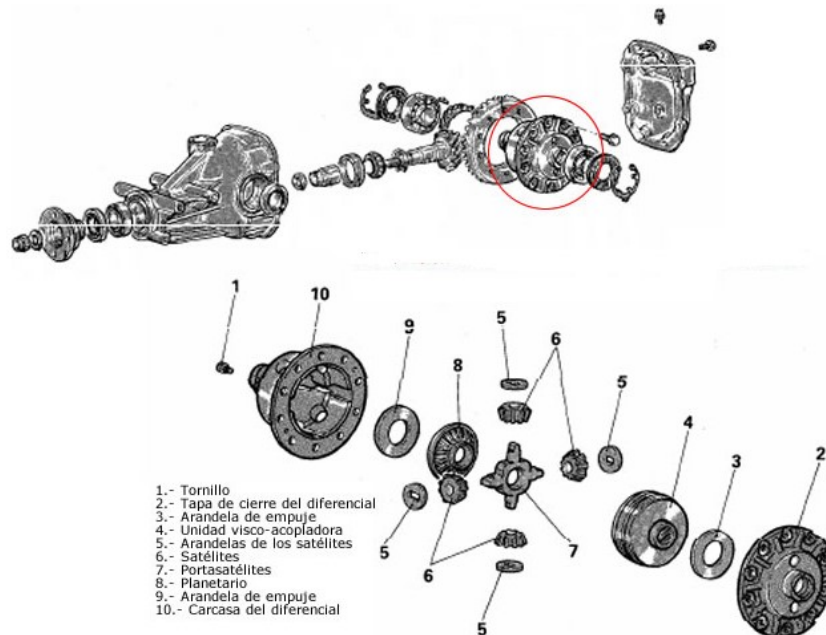


Figura 60: Mecanismo de transmisión de potencia en un motor de combustión interna.

Fuente: www.ingenieriadeautomocion.wordpress.com

El sistema, funciona correctamente si la transmisión de potencia en realizada en forma pareja y sin interrupciones, mientras que su accionamiento se realiza de forma suave, aplicando la fuerza especificada por el fabricante. Por lo tanto, se debe de mantener en la separación de los discos una distancia preestablecida, para que a su vez los resortes tengan la tensión de separación adecuada de acuerdo a la fuerza a ejercer en el accionamiento. Además, es importante en correcto montaje de los rodamientos, en los cuales se apoya el eje de salida, los cuales deben recibir una apropiada lubricación. (17)

3.21.5.14.2.-Principales fallos en un mecanismo de transmisión de potencia.

Los principales fallos en este sistema se generan debido al desgaste que sufren los rodamientos por la fricción del acople y desacople, dando lugar a un resbalamiento entre los discos y los rodamientos. De esta manera, se incrementa el desgaste de estos elementos, hasta alcanzar la rotura. Una falta de lubricación da lugar a esta serie de problemas junto con las sobretensiones en las correas de accionamiento o las grandes desalineaciones en el eje de salida. (19)

3.21.5.14.3.-Seguridad y mantenimiento de un mecanismo de transmisión de potencia.

Las reparaciones van desde un simple ajuste sobre la tuerca que registra la tensión de los resortes y con esto la distancia entre los platos fijos, los móviles y los rodamientos, hasta el engrase de los rodamientos y partes móviles, sin olvidar el reemplazo de estas piezas en caso de excesivo desgaste, por lo que se debe desarmar totalmente el conjunto.

En cuanto a las precauciones de seguridad, consisten fundamentalmente en el trabajo con el motor detenido y que se encuentran mecanismos en movimiento. (18) Finalmente, en cuanto al cuidado medioambiental, se debe de realizar una correcta disposición de los elementos y las sustancias empleadas, debido a su alto riesgo de contaminación.

3.21.5.15.-Sistema de inyección electrónica de combustible.

Este mecanismo, consiste en un sistema que reemplaza el carburador en los motores a gasolina. Su introducción, se debió a un factor en las exigencias de los organismos de control del medio ambiente, para así disminuir las emisiones en dichos motores.

Su importancia radica en su capacidad más óptima, respecto al carburador, para dosificar el combustible y crear una mezcla combustible/comburente muy próxima a la estequiometría, 15/1 en la gasolina. De esta forma, se garantiza una muy buena combustión, junto con una reducción importante de los gases tóxicos. La relación estequiométrica, es la proporción exacta de combustible y comburente, para garantizar una reacción completa de todo el combustible.

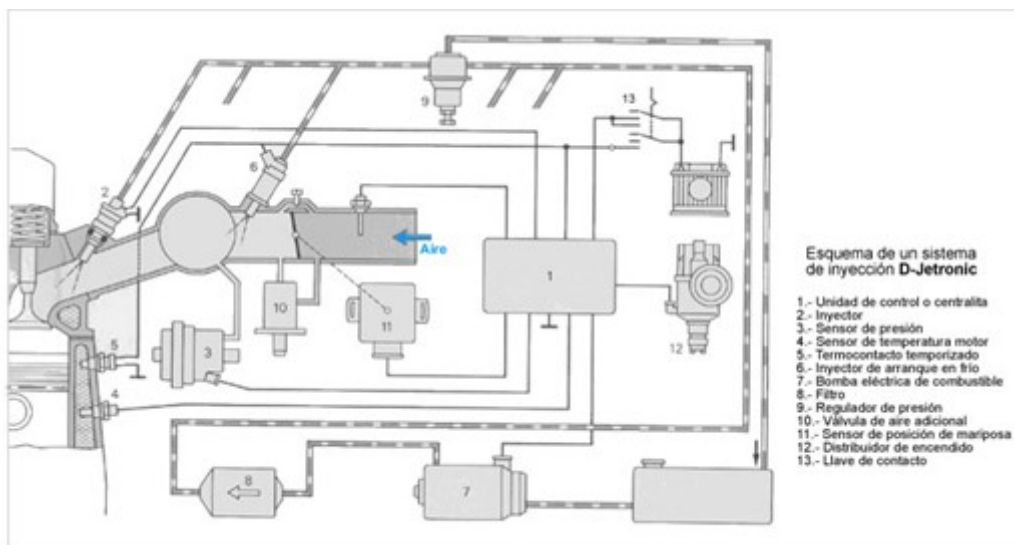


Figura 61: Esquema de un sistema de inyección electrónica de combustible, en motores de combustión interna. Modelo D-Jetronic.

Fuente: www.aficionadosalamecanica.com

En su función, toma aire del medio ambiente y lo mide, para a continuación introducirlo al motor. Luego, de acuerdo a esta medición y conforme al régimen de funcionamiento del motor, inyecta la cantidad de combustible necesaria para que la combustión sea lo más completa posible.

3.21.5.15.1.-Funcionamiento de un sistema de inyección electrónica de combustible.

Consta fundamentalmente de un conjunto de sensores, de una unidad electrónica de control y una serie de actuadores o accionadores, por lo que su funcionamiento, se encuentra basado en la medición de ciertos parámetros de funcionamiento en el motor. En la siguiente gráfica, se pueden observar los principales parámetros a obtener. (18)

Tabla 3: Parámetros de un sistema de inyección electrónica de combustible.

Parámetro:	Unidades:
1. Caudal del aire (Q_{air}).	• m ³ /s.
2. Temperatura del aire (T_{air}).	• Kº.
3. Temperatura del refrigerante (T_{ref}).	• Kº.
4. Estado de carga (PAM).	• %.
5. Cantidad de oxígeno en los gases de escape (V_{gases}).	• m ³ .
6. Revoluciones del motor (rpm).	• rpm.

Estas señales, son procesadas mediante una unidad de control, dando como resultado una serie de impulsos que son transmitidos hacia los accionadores, los cuales se encargan del control en la inyección del combustible. A su vez, estos impulsos son enviados a otras partes del motor, para obtener una combustión con un mayor grado de sincronización.

El sensor PAM (Presión absoluta del múltiple), indica la presión absoluta en el múltiple de admisión, mientras que el sensor EGO (Exhaust Gas Oxygen), muestra la cantidad de oxígeno presente en los gases de combustión. (19)



Figura 62: Sensor tipo PAM.

Figura 63: Sensor tipo EGO.

Fuente: www.counterpersontraining.com

Dicho sistema, funciona correctamente si a régimen constante se logra mantener la relación combustible/comburente cercana a la estequiometría. Dicho acto, se puede comprobar mediante un análisis en los gases de combustión, pero al igual que en los sistemas con carburador, debe proveer un suave funcionamiento y sin interrupciones en los diferentes regímenes de marcha.

3.21.5.15.2.-Seguridad y mantenimiento de un sistema de inyección electrónica de combustible, ante sus principales fallos.

Para el aviso de algún funcionamiento irregular en el mecanismo, se emplea un sistema de autocontrol o auto diagnóstico, el cual se encuentra incorporado, que es capaz de realizar diagnósticos externos mediante el uso de un scanner electrónico. De esta manera, se realiza un exhaustivo control, indicando aquellos parámetros que se encuentren fuera de rango.

La detección de fallos, ha de realizarse mediante el personal especializado en estos sistemas, debiendo contar con herramientas electrónicas de diagnóstico, especiales para cada tipo de sistema de inyección. En cuanto a la reparación de estos sistemas, ésta se ve limitada por el reemplazo de los componentes con un funcionamiento incorrecto, generalmente los que el diagnóstico electrónico considera como defectuosos. (19)

Los sistemas de inyección electrónicos, no difieren de los demás, respecto a las normas de seguridad, debido a que manipula combustibles y sustancias explosivas. Lo mismo ocurre en el cuidado con el medio ambiente, por lo que la manipulación ha de realizarse con una precaución específica, para no generar derrames de combustible.

3.21.5.16.-Torque y potencia, medición de la potencia en un motor de combustión interna.

Dentro de la mecánica, se contemplan dos conceptos de alta importancia a la hora del cálculo de la potencia en un motor de combustión interna, los cuales se analizan a continuación. (18)

1.-Torque: Consiste en el producto de una determinada fuerza y la distancia en la cual dicha fuerza es aplicada, aunque también es conocido con el nombre de momento, par, o trabajo mecánico. Otra definición, es conocida como el trabajo capaz de ser realizado mediante un motor, en N*m.

- **Ecuación 1:** $M = r * F$, donde "r" es la distancia en la cual la fuerza es aplicada (m) y "F" es la fuerza aplicada (N).

2.-Potencia: Consiste en el trabajo a desarrollar por unidad de tiempo, es decir, la velocidad con la que se puede realizar trabajo, en CV, kW o HP.

- **Ecuación 2:** $P = M * w$, donde "M" es el par motor o torque, en N*m, y "w" es la velocidad angular en rad/s. Por lo cual, la potencia obtenida se da en vatios (w).

Una vez tenidos en cuenta estos dos conceptos y su relación, se pueden analizar los primeros métodos para calcular la potencia empleada. Para ello, se utiliza un elemento denominado dinamómetro, que a pesar de que actualmente ya no se emplea a nivel industrial debido a los incrementos en los sistemas computacionales, es bastante útil a niveles de laboratorio, ya que proporciona unos conceptos lo suficientemente claros. El mismo,

simplemente consiste en un sistema compuesto mediante un freno y una balanza. Los ensayos, se han de realizar a distintas revoluciones en un motor, para así poder definir la curva de potencia frente a sus revoluciones por unidad de tiempo, en la cual se observa que a medida que el motor es frenado, se mantienen unas determinadas revoluciones. El freno, se encuentra conectado mediante una palanca de longitud conocida al plato de la balanza, con la que se mide la fuerza ejercida. Como se ha explicado anteriormente, el producto de la fuerza por la distancia donde se aplica, se denomina torque del motor, mientras que como la potencia es el producto del torque por la unidad de tiempo, de esta forma se puede determinar la potencia desarrollada por el motor, al relacionar el par con las revoluciones por minuto de dicho motor.

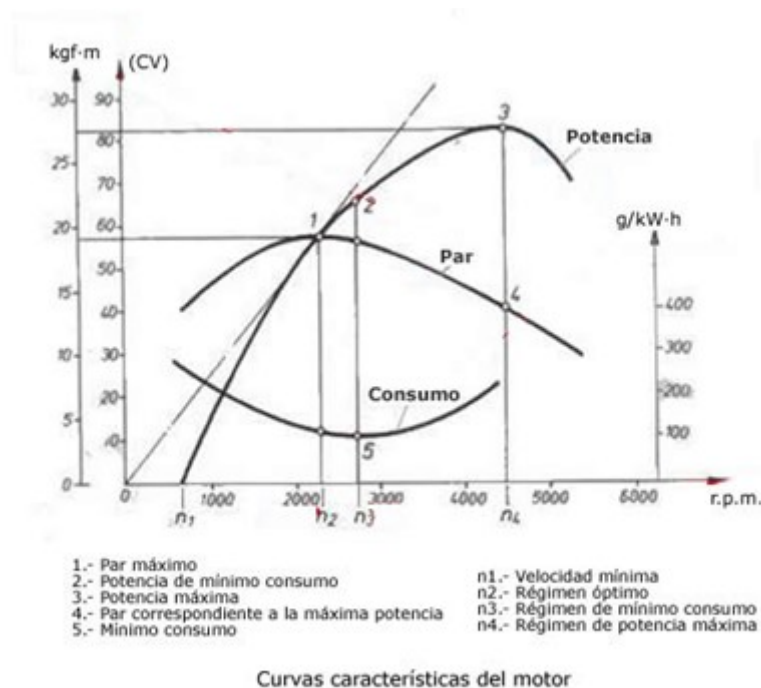


Figura 64: Curva característica de potencia frente al número de revoluciones por unidad de tiempo en un motor de combustión interna.

Fuente: www.aficionadosalamecanica.com

Finalmente, mediante el ordenamiento de las unidades y realizando conversiones de éstas, se puede obtener la potencia en CV o kW, principales unidades empleadas.

A continuación vamos a observar una serie de curvas característica de torque y potencia, mediante el empleo de diferentes combustibles tales como gasolina y etanol, para el modelo Hyundai Novo HB20.

Como se puede observar en los siguientes, para velocidades comprendidas entre las 2.000 y las 3.000 revoluciones por minuto, el motor funciona en porcentajes del 80% al 90% del par máximo. Por lo tanto, aunque la fuerza máxima es alcanzada a 5.000rpm, a velocidades más bajas ya existe una muy buena disponibilidad de la potencia.

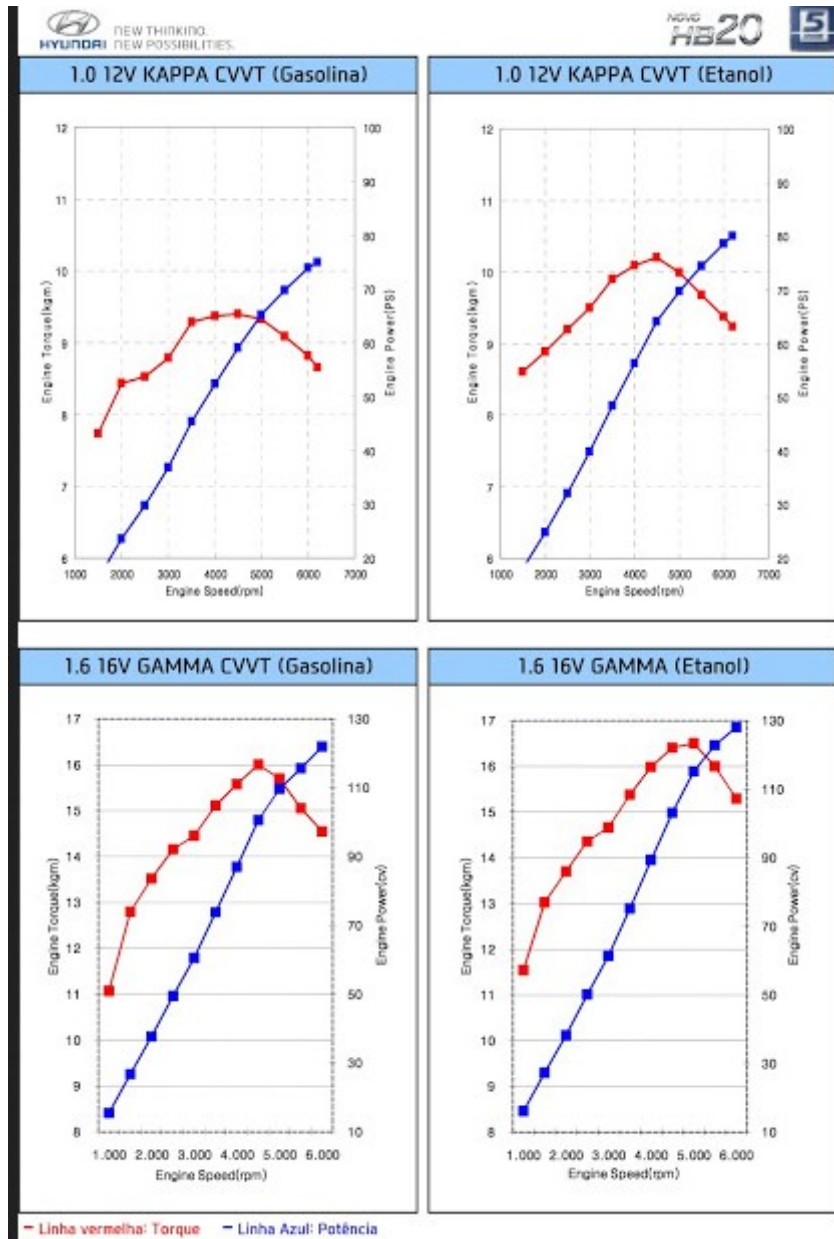


Figura 65: Curvas característica de torque y potencia, mediante el empleo de diferentes combustibles, para el modelo Hyundai Novo HB20.

Fuente: Ficha técnica del Hyundai Novo HB20.

Una de las principales variantes dentro del mundo de los motores de combustión interna de ignición por chispa, la cual se va a analizar a continuación, se trata de los motores de combustión interna rotativos, también conocidos como motores Wankel.

3.21.6.-El motor rotativo o Wankel, una variante dentro de los motores de combustión interna.

El motor Wankel o también conocido como rotativo, es un tipo especial de motor de gasolina, dentro del grupo de los motores de combustión interna.

Se encuentra caracterizado mediante una cámara de combustión, en la cual un rotor hace posible que se produzcan los cuatro tiempos de la combustión, contando con un movimiento constante y sin tiempos muertos. Es decir, el rotor gira continuamente, mientras se efectúa la admisión, compresión y combustión de combustible, las cuales van seguidas por el escape de los gases resultantes.



Figura 66: Motor Wankel.

Fuente: www.motor3punto0.com

3.21.6.1.-Estructura y funcionamiento de un motor rotativo.

El motor rotativo se compone fundamentalmente de una carcasa en forma de óvalo y de un rotor de forma triangular, en su interior. El espaciado entre el rotor y la pared interior de la carcasa, proporciona las cámaras durante la combustión interna, mientras que la suficiente presión durante la expansión de los gases, sirve para hacer girar al rotor. Con la finalidad de hacerlo funcionar de igual manera que un motor de combustión interna, los cuatro procesos de admisión, compresión, combustión y escape se han de llevar a cabo en la en la cámara de combustión, en el interior de dicha carcasa. A continuación se presenta un despliegue de todos y cada uno de los componentes que dan lugar a esta clase de motores. (20)

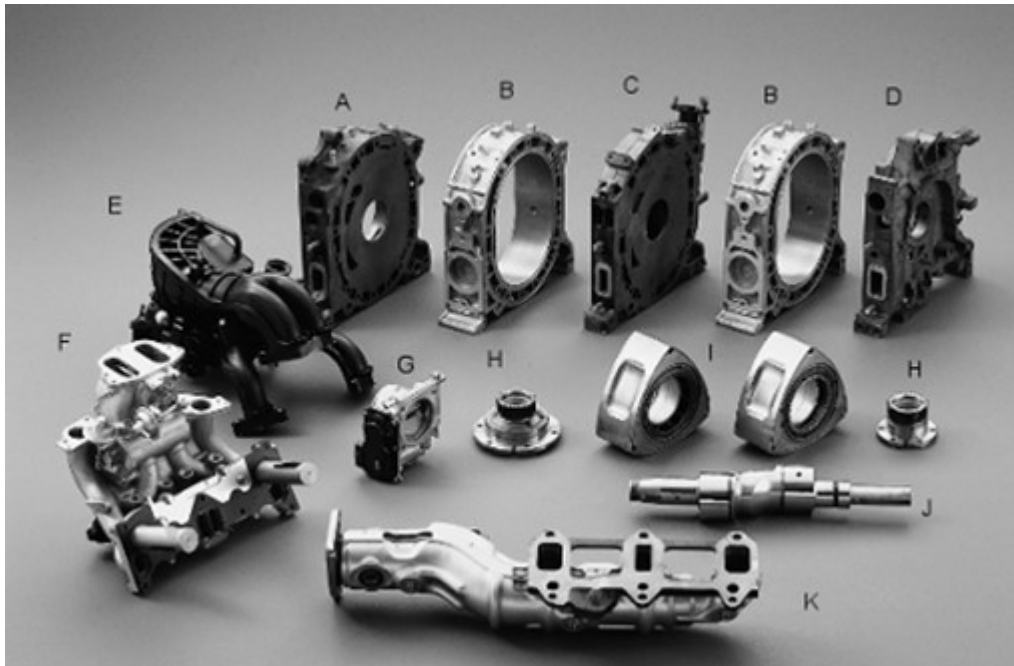


Figura 67: Despliegue de los componentes que dan lugar a un motor rotativo.

Fuente: www.e-auto.com.mx

- A. Carcasa posterior.
- B. Alojamiento del rotor.
- C. Carcasa interior.
- D. Carcasa frontal.
- E. Primer múltiple de admisión.
- F. Segundo múltiple de admisión.
- G. Válvula de aceleración.
- H. Engranaje estacionario.
- I. Rotor.
- J. Eje excéntrico.
- K. Múltiple de escape.

Posteriormente, se ha de suponer que dicho rotor triangular es colocado concéntricamente en el interior de una cubierta circular de verdad. En este caso, la cámara de combustión no varía en volumen a medida que el rotor gira en el interior. Incluso si la mezcla entre el comburente y el combustible diera lugar en su interior, la presión de la expansión del gas durante la combustión no haría nada más que trabajar hacia el centro del rotor. En esta situación, no se generaría la rotación. (21)

Este es el motivo, por el cual la periferia interior de la carcasa se contornea mediante una forma curvada denominada trocoide y a su vez, rotor gira instalado en un eje excéntrico.

En cuanto a la cámara de combustión, ésta cambia de volumen dos veces por revolución, por lo cual, los 4 tiempos del motor de combustión interna son realizados.

Con esta clase de motores, los picos del rotor trazan el contorno oval de la periferia interior en la carcasa del motor, mientras que permanecen en contacto con el engranaje en el eje de salida. Éste, también se encuentra en órbita excéntrica alrededor del punto central de la carcasa del motor. Para ello, existe un mecanismo de engranaje, el cual posee la función de dictar la órbita del rotor. Este engranaje de fase, consiste tanto de un elemento de dientes ubicado en el interior del rotor, como de otro exterior colocado en un eje excéntrico.

El presente engranaje del rotor contiene una cifra de treinta 30 dientes en su interior, por lo que el engranaje del eje ha de tener veinte dientes en su perímetro. De esta manera, la relación de transmisión es de 3/2 y por lo tanto, la tasa de velocidad del giro entre el rotor y el eje, queda definida con una relación de 1/3. (20)

Sin embargo, el rotor posee un mayor período de rotación que el del eje excéntrico. Esto es, que si el rotor gira una vuelta, el eje excéntrico girará el triple de vueltas, es decir, con el motor funcionando a 3000 rpm, el rotor girará a 1000rpm. (20)

A continuación, para visualizar a este proceso de una manera más visual, se exponen las etapas las cuales componen un ciclo de funcionamiento para estos motores, durante la combustión.

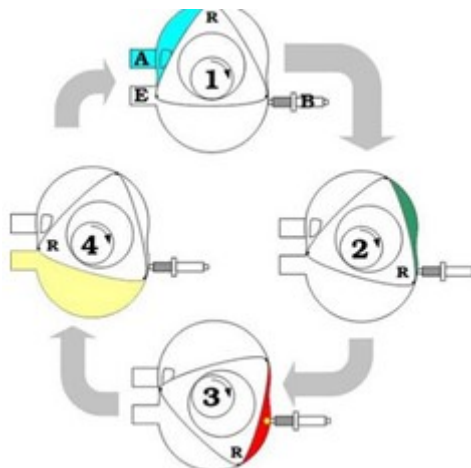


Figura 68: Ciclo de combustión de un motor rotativo o Wankel.

Fuente: www.mecanicaltec.blogspot.com

1. **Admisión:** Esta primera etapa, comienza cuando uno de los vértices del rotor alcanza el punto "A" de la lumbrera de admisión. Seguido, el desplazamiento del rotor va incrementando progresivamente el volumen en la cámara, la cual se va llenando de aire, hasta que el vértice consecutivo cierra la lumbrera.
2. **Compresión:** En este segundo paso, la mezcla admitida entre el comburente y el combustible, queda encerrada en la cámara entre dos lados consecutivos del rotor. Por lo tanto, disminuye su volumen produciendo la compresión de los gases. Antes de llegar a la máxima compresión, con un cierto avance, se produce el encendido mediante el salto de la chispa en las bujías, dando lugar a la combustión.

3. **Explosión o combustión:** En este tercer paso, el aumento de presión que produce la combustión, impulsa al rotor mientras se realiza la expansión de los gases. Ésta se prolonga hasta que el vértice del rotor alcanza el punto "A" de nuevo, en el cual abre la lumbrera de escape.
4. **Escape:** En este último tramo, una vez descubierta la lumbrera de escape, los gases quemados son expulsados a gran velocidad debido a la presión residual de la expansión. El giro del rotor va disminuyendo el volumen de la cámara hasta completar el proceso, momento que tiene lugar cuando el segundo vértice del rotor rebasa la lumbrera de escape. La eficacia del intercambio de gases depende de la posición de dichas lumbreras.

3.21.6.2.-Características del motor rotativo.

Esta clase de motores de combustión interna, poseen una serie de características, los cuales los hacen únicos dentro del ámbito de los motores de combustión interna. Estas ventajas, se pueden dividir en cinco agrupaciones.

1. Su menor tamaño: El motor rotativo tiene posee varias ventajas, pero la más importante es que se reduce su tamaño y como consecuencia, también lo hace su peso. Cuando un motor rotativo se considera equivalente a un motor de seis cilindros en línea, tanto a nivel de ruido y como en su suavidad de funcionamiento, el motor Wankel puede ser dos tercios menor en peso y en tamaño. De esta manera, se logran los mismos niveles de potencia y de par. Esta ventaja es muy atractiva para los diseñadores de automóviles, especialmente a la luz de las tendencias actuales con requisitos más estrictos en la resistencia al impacto, la aerodinámica, la distribución del peso y en el empleo del espacio. En la siguiente figura, se observa una comparativa entre los tamaños de un motor rotativo, uno de cuatro cilindros y otro de seis cilindros.

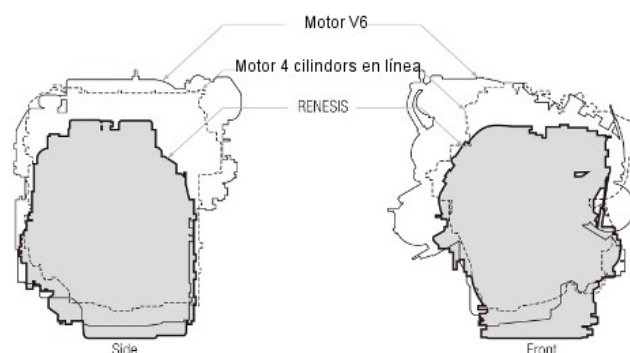


Figura: Comparación entre los perfiles de tres motores de la marca Mazda. Un motor de seis cilindros, otro de cuatro y el motor rotativo, modelo Renesis.

Fuente: www.mazda.com

2. **Su par constante:** El motor rotativo posee una curva de par bastante constante en todo su rango de velocidades y de acuerdo a numerosas investigaciones, las fluctuaciones que sufre el par durante la operación están en el mismo nivel que un motor de seis cilindros. También se ha comprobado que mediante el diseño de tres rotores, se consiguen menores fluctuaciones que en un motor de ocho cilindros. En la siguiente figura, se puede observar de una manera gráfica.

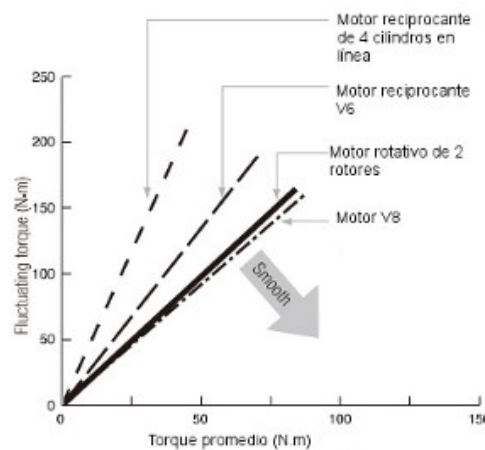


Figura 69: Gráfica que representa la relación entre el par y las fluctuaciones generadas en diferentes tipos de motores de combustión interna.

Fuente: www.mazda.com

3. **Vibraciones y ruido generado:** Con un motor de cilindros, el movimiento del pistón es en sí una fuente de vibración, mientras que el mecanismo de válvulas genera ruidos no deseados. Los movimientos suaves del motor rotativo, dan lugar a una serie de vibraciones considerablemente menores y la ausencia de un mecanismo de válvulas, contribuye a un funcionamiento más suave y silencioso.
4. **Estructura:** Este tipo de motor, convierte directamente la presión, tras la expansión de la mezcla, en fuerza de rotacional en el rotor y en eje excéntrico, por lo que no existe necesidad alguna de emplear bielas. A su vez, la admisión y el escape tienen lugar por el movimiento del rotor en sí. Por lo tanto, tampoco hay necesidad en el uso de un mecanismo de válvulas que incluye la correa o cadena de distribución, el árbol de levas, los balancines, las válvulas y sus resortes. Esta es la razón, por la cual se puede construir un motor rotatorio con un menor número de piezas, en comparación con otras clases de motores de combustión interna.
5. **Durabilidad:** Como se mencionó anteriormente, el rotor gira con una relación de 1/3 de la velocidad del motor. Por lo tanto, cuando el motor rotativo gira a velocidades de 7000 o 8000 rpm, el rotor está girando una tercera parte de este coeficiente. Además, puesto que el motor rotativo no tiene balancines y bielas, es más confiable y duradero en condiciones de alta demanda.

3.21.6.3.-Desventajas en inconvenientes de los motores rotativos.

A pesar de la serie de ventajas que ofrece esta clase de motores, éstos presentan una serie de importantes inconvenientes, los cuales han dado lugar a que numerosos fabricantes de automóviles, pongan en duda que el motor rotativo tenga cabida en sus planes futuros. Estos inconvenientes deben su causa a las siguientes razones.

1. La normativa vigente, es cada vez más exigente en cuanto a emisiones contaminantes, las cuales generan que este tipo de motor tenga pocas probabilidades de supervivencia, ya que para ajustarse a dicha legislación es necesario una optimización dentro de este grupo de motores. Esto es debido a que los motores rotativos poseen una serie de dificultades equivalentes a las de los motores de dos tiempos, a la hora de hablar de sus emisiones. Además consumir el comburente y el combustible, emplea importantes cantidades de aceite para poder disminuir la constante fricción entre el rotor y las paredes del estator, por lo cual, son motores de un elevado consumo.
2. Otro segundo inconveniente, se debe a la no existencia de un freno motor como tal, por lo que es más parecido a un motor de dos tiempos que a otro cuatro tiempos. Motivo por el cual, es necesario compensarlo con sistemas de frenos más potentes de lo que parecería necesario.
3. Ya que se tratan de motores complejos, esto queda reflejado en las necesidades de estanqueidad entre las diferentes secciones del rotor. Aparte de eso, la complejidad también se nota en el encendido, pues todas las piezas y componentes deben estar perfectamente sincronizados para no producir una combustión precoz, capaz de estropear el motor.
4. Finalmente, una menor cantidad de motores rotativos en el mundo, significa que los mantenimientos son más caros. Como se puede observar experimentalmente, los motores más empleados, son los que poseen mantenimientos más económicos, precisamente por dicha universalidad.

A día de hoy, debido esta serie de motivos se puede expresar que se tratan de motores que no poseen una continuidad a corto, medio o largo plazo, ya que son motores caros, peculiares en su mantenimiento, con una mayor fragilidad y que a pesar de sus ventajas, no terminan de compensar su mantenimiento. Además se le debe sumar, como se explicó anteriormente, su elevado consumo en aceites, junto con las importantes problemáticas que esto conlleva.

3.21.6.4.-Aceites empleados en esta clase de motores rotativos.

En los motores Wankel, al contener los vértices del rotor en permanente contacto con el estator, es necesaria una lubricación permanente. Como además, durante la combustión, se implica la quema del aceite existente en la cámara en dicho momento, el depósito se va a ir consumiéndose progresivamente.

A la hora de elegir el aceite más adecuado para este tipo de motores, se debe de tener en cuenta una serie de pautas. En un primer lugar, ya que en un motor rotativo el aceite es necesario para el funcionamiento, éste debe consumirse de la manera más limpia posible, sin degradar al medio ambiente. Tradicionalmente, se recomienda emplear aceites minerales para este tipo de motores y al poder ser, que no sean sintéticos, debido a su combustión, ya que no todos van a entrar en la combustión de igual manera. Esta es la razón por la cual se ha de tener especial atención en el aceite empleado. Generalmente se aconseja emplear aceites del Grupo III, tales como aceites "5w20" y "5w30". (4)



Figura 70: Aceites empleados para los motores rotativos de la marca Mazda.

Fuente: www.mazda.es

3.21.6.5.-Comparación entre un motor rotativo y un motor de cilindros.

Con la finalidad de obtener la fuerza de giro, tanto el motor de cilindros y como el motor rotativo, se basan en la presión de expansión creada tras la combustión entre la mezcla del aire y el combustible. La diferencia entre los mecanismos de ambos motores, se encuentra en la forma con la cual, la presión de expansión es empleada.

En un primer lugar, en un motor de pistón, la presión generada tras la expansión, empuja al pistón desplazándolo hacia su parte inferior, mientras que la fuerza mecánica se transfiere a la biela, la cual provoca la rotación del cigüeñal.

En el caso del motor Wankel, esta presión de expansión, se aplica a un costado del rotor, obteniendo como resultado que uno de los tres lados de un triángulo, sea forzado hacia el centro del eje excéntrico. Este movimiento está compuesto por dos fuerzas divididas. Una es la fuerza hacia el centro del eje de salida y la otra es la fuerza de cizalla, que hace girar al eje de salida.

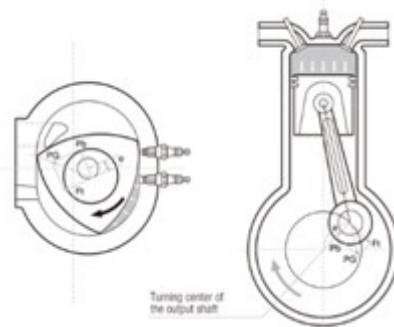


Figura 71: Esquema comparativo entre el funcionamiento de un motor Wankel y un motor de cilindro.

Fuente: www.mazda.com

Por otro lado, el espacio interior de la carcasa, se encuentra siempre dividida en tres cámaras de combustión. Debido al giro del rotor, estas tres cámaras de trabajo están siempre en movimiento para realizar los cuatro tiempos, ya sea la admisión, la compresión, la ignición o el escape dentro de la carcasa. Cada proceso es llevado a cabo en un lugar diferente en la cámara trocoide. Esto es significativamente diferente en un motor de pistón, donde los cuatro procesos se llevan a cabo dentro de cada cilindro.

Para poder expresar el volumen en el desplazamiento de un motor rotativo, se calcula generalmente mediante el producto entre el volumen de la cámara y el número de rotores.

También, se ha de comentar, que el volumen de la cámara representa la diferencia entre el volumen máximo y el volumen mínimo, en una cámara de combustión. A su vez, la relación de compresión queda definida como el cociente entre el volumen máximo y el volumen mínimo.

Las definiciones que se han de emplear son las mismas para el motor de pistón, el cual ya fue explicado con especial atención. A continuación en la siguiente figura, se comparan los cambios del volumen de la cámara de combustión del motor rotativo y el motor de pistones. Aunque en ambos motores, el volumen de la cámara de combustión varía suavemente en forma de onda, existen dos diferencias fundamentales entre ambos motores.

Una de estas dos diferencias, es el ángulo de giro por cada ciclo. El motor de pistón gira 180 grados, mientras que el motor rotativo lo realiza a 270 grados, 1,5 más ampliamente que en un motor con pistón. Es decir, en el motor de pistón, el cigüeñal genera dos vueltas de 720 grados, durante los cuatro procesos, mientras que en el motor rotativo, en el eje excéntrico hace tres vueltas de 1080 grados, junto con el rotor, el cual hace una vuelta. (21) De esta manera, el motor rotativo tiene un proceso más tardío, produciendo un torque con menores fluctuaciones y por lo tanto, un funcionamiento más suave.

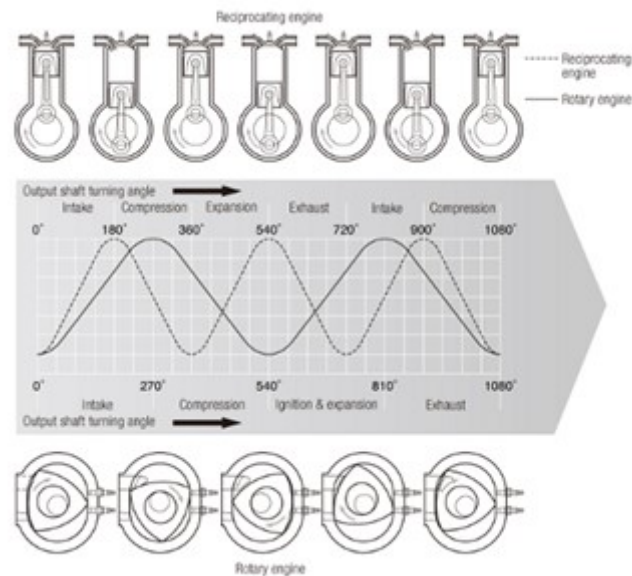


Figura 72: En la siguiente figura, se comparan los cambios del volumen en la cámara de combustión de un motor rotativo y de otro motor de pistones.

Fuente: www.mazda.com

Finalmente, incluso a altas velocidades, la velocidad del rotor es comparativamente más lenta, por lo cual los tiempos en la admisión y en el escape son más largos, facilitando el desarrollo de todo el proceso y logrando un mayor rendimiento.

3.21.6.6.-Funcionamiento de un motor rotativo con hidrógeno (H₂) como combustible.

En estos tipos de motores, tras diferentes ensayos experimentales con dinamómetro, parecen proporcionar buenos resultados al emplear hidrogeno como combustible. Estos resultados favorables, se deben a la configuración que posee este motor, con la cual se reducen las dificultades en combustión, generadas en los otros tipos de motores. (7)

El motor Wankel, no suele dar problemas de autoencendido, debido a que la cámara de combustión presenta una geometría adecuada para la ignición del hidrógeno. Ésta posee una relación entre el volumen y su superficie, de elevado valor.

Además, a pesar de que los gases de escape fueran responsables del autoencendido, tampoco generarían importantes problemas en el motor, ya que al aspirar nuevos gases, la cámara se encontraría vacía y los gases de escape no estarían presentes en ese instante.

Por otro lado, mediante la configuración que poseen estos motores, es posible aprovechar la alta temperatura en la ignición del hidrógeno. Entre algunos de los campos de investigación de esta tecnología, se está investigando sobre la posibilidad de incluir agua pulverizada dentro de la mezcla a la entrada. Ésta se evaporaría al quemarse el hidrogeno, llegando así a ejercer presiones elásticas muy elevadas.

Hoy en día, algunas compañías del automóvil, están investigando para conseguir que la mayor parte de la potencia se deba a la acción del vapor de agua y no a la del hidrogeno en sí. (4)

Sin embargo, esta clase de motores automovilísticos, sigue presentando una serie de inconvenientes, tales como los que se analizaron anteriormente, los cuales a día de hoy no dan lugar a una continuidad a corto, medio o largo plazo.

A continuación, se presenta una comparativa realizada por la compañía automovilística Magda, principal promotora de motores rotativos, en la cual se muestran los resultados tras el empleo de gasolina e hidrógeno como combustible. Los ensayos han sido realizados con el modelo Mazda MX-5. (4)

Tabla 4: Propiedades del Mazda MX-5, empleando H₂ y gasolina.

Combustible empleado.	Gasolina	Hidrógeno (H ₂).
Potencia en kW	88,32	80,96
Velocidad máxima (km/h).	183	150
Tiempo de aceleración de 0 a 100 Km/h, en segundos (s).	9,4	13
Tiempo medio de repostaje del combustible, en segundos (s).	180	900

Como se puede observar, las prestaciones son bastante similares entre el empleo de estos dos combustibles dentro de los motores Wankel, sin haber tener en cuenta las diferentes prestaciones que ofrecen ambos combustibles, con sus ventajas e inconvenientes, las cuales se estudiarán más adelante en el presente estudio.

Una vez estudiado el motor de combustión interna rotativo, se va realizar un breve análisis de los sistemas híbridos, los cuales combinan el sistema de combustión interna convencional con un mecanismo eléctrico, los cuales poseen un importante empleo en la actualidad.

3.21.7.-Vehículos híbridos.

Se trata de una clase de vehículos, capaces de combinar un motor de combustión interna, con otro de tipo eléctrico, el cual se encuentra alimentado por baterías adicionales conectadas a la principal. (22) Probablemente no se trate del sistema más eficiente en un futuro, pero actualmente juegan un papel importante en el mundo del automóvil.



Figura 73: Estructura del modelo del vehículo híbrido, Toyota Prius.

Fuente: www.aficionadosalamecanica.net

3.21.7.1.-Componentes de un vehículo híbrido.

Este tipo de vehículos tiene varios componentes comunes independientemente de la arquitectura (híbrido en serie, paralelo o combinado). Si fuese un vehículo 100% eléctrico no tendría motor térmico, y el resto es igual.

- **Motor de combustión interna:** Este tipo de motores puede ser bien de ignición por chispa o bien por compresión. Sin embargo, poseen una baja cilindrada respecto a un modelo equivalente de un motor convencional, sobreponiéndose el par máximo sobre la potencia.
- **Motor eléctrico:** En un vehículo híbrido pueden coexistir más de uno y siempre van conectados a la transmisión o directamente en las ruedas. Su emisiones sonoras son prácticamente nulas y proporcionan casi todo el par en un régimen bajo de revoluciones.
- **Regeneradores:** Son dispositivos de fricción instalados en las ruedas, los cuales son capaces de recuperar y generar energía eléctrica tras las frenadas, desaceleraciones y aceleraciones, la cual es almacenada en las baterías.
- **Sistema de almacenamiento energético:** Es el encargado de almacenar la energía eléctrica generada. Fundamentalmente se encuentran situados en la parte trasera, necesitando de un sistema de refrigeración.
- **CPU:** Debido a que generalmente esta clase de vehículos se tratan de modelos automáticos, para que éstos sean más eficientes debe encontrarse gestionados en base a un ordenador con múltiples circuitos electrónicos, al igual que en el resto de automóviles.

3.21.7.2.-Propiedades de los vehículos híbridos frente a los convencionales.

Fundamentalmente, esta clase de automóviles posee la ventaja de trabajar con combustibles convencionales, con la ventaja de realizar un consumo inferior, haciendo de estos una clase de modelos bastante eficientes, menos silenciosos y de bajas emisiones. A su vez, no se requiere de un mantenimiento específico, con una vida útil similar a la de cualquier vehículo convencional.

En cuanto a su arranque, se emplea motor eléctrico con o sin el motor térmico, lo cual da lugar a una baja demanda en la aceleración. De esta manera se evita los puntos de ineficiencia generados por motor térmico durante la puesta en marcha. Como el motor térmico es de potencia más ajustada, el eléctrico se utiliza de soporte durante las aceleraciones bruscas, por lo que al tener que realizar un menor esfuerzo el térmico, el consumo de combustible es menor.

Durante su funcionamiento sobre zonas urbanas, el motor eléctrico puede realizar toda labor de empuje, mientras el nivel de carga de las baterías así lo permita. De esta manera el consumo de combustible pasa a ser nulo, eliminándose las emisiones y el sonido en el sistema.

Por el contrario, manteniendo una velocidad de tipo crucero, es el motor de combustión el encargado de empujar al vehículo, con puntuales asistencias del motor eléctrico durante ligeras pendientes. Mediante este método, la elevada eficiencia del motor térmico rebaja el consumo y es más sencillo mantener una velocidad que hacer variaciones en ella (aceleración en este caso). Tampoco se ha de olvidar que si la potencia de frenada exigida es baja, en vez de utilizarse los frenos de disco, el generador ofrece una alta resistencia al avance y convierte el movimiento del vehículo en electricidad para recargar baterías, mediante fricción. (22)

3.21.7.3-Clasificación de los vehículos híbridos.

Fundamentalmente, podemos encontrar una clasificación formada por tres clases de automóviles híbridos de acuerdo a la distribución de sus elementos. (22)

- a) Híbrido en serie: El motor de combustión interna no se encuentra conectado mecánicamente a las ruedas, debido a que únicamente se emplea para la generación eléctrica. El presente motor, es el encargado de recargar la batería hasta su totalidad, momento en el cual se desconecta de manera temporal. El desplazamiento del coche, por lo tanto, es realizado por parte de un motor eléctrico.

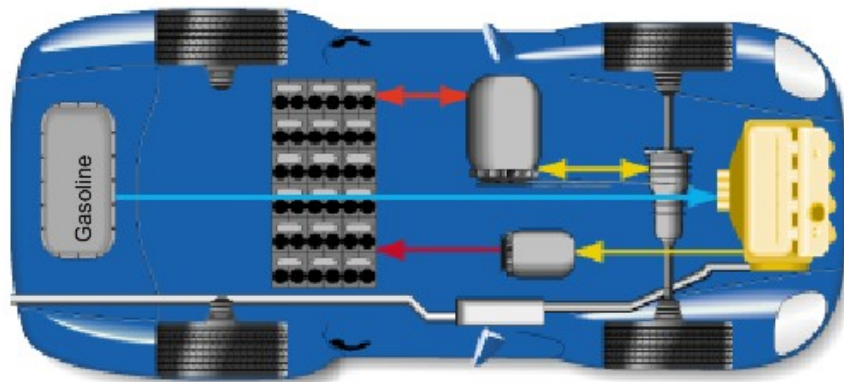


Figura 74: Esquema de funcionamiento de un híbrido en serie.

Fuente: Obtenida de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

- b) Híbrido en paralelo: En esta segunda clase de híbridos, tanto el motor de combustión interna como el motor eléctrico, son los encargados de transmitir el movimiento a las ruedas, por lo que se trata de una solución sencilla, pero no lo bastante eficiente.

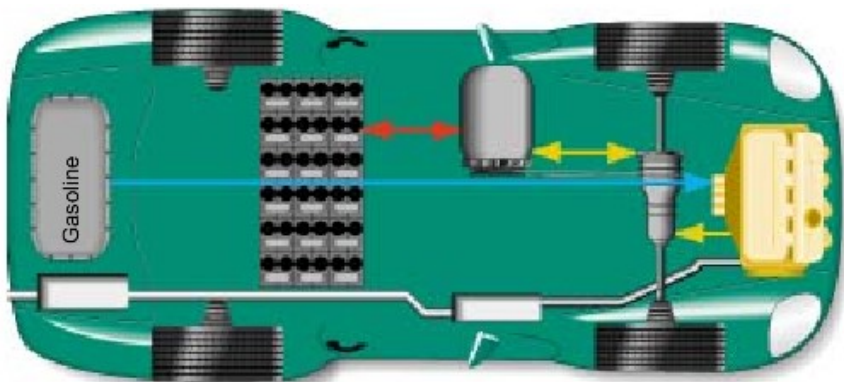


Figura 75: Esquema de funcionamiento de un híbrido en paralelo.

Fuente: Obtenida de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

- c) Híbrido combinado: Se trata de un mecanismo en serie, con la diferencia de que el motor de combustión interna posee conexión mecánica a las ruedas. De esta manera se logra una solución de elevada eficiencia, la cual posee una mayor complejidad tanto a nivel mecánico, como electrónico.

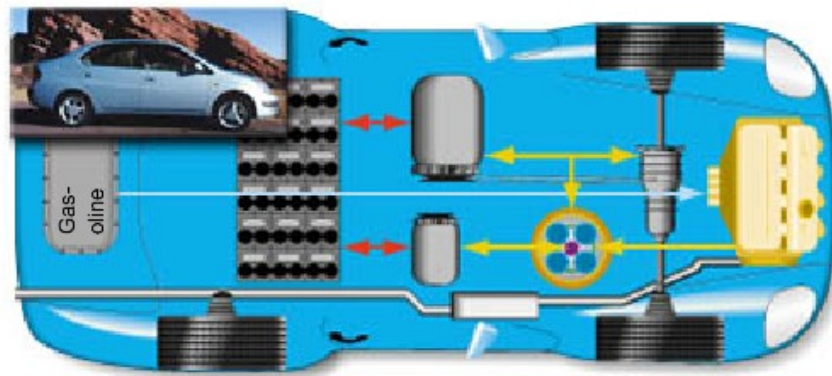


Figura 76: Esquema de funcionamiento de un híbrido combinado.

Fuente: Obtenida de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

Sin embargo, a día de hoy, también se suele emplear otra clasificación algo más compleja, la cual es realizada a partir de ciertos parámetros de sus componentes. Dicha clasificación se encuentra compuesta por cinco grupos, los cuales son explicados a continuación.

- a) Microhíbridos: Esta clase de automóviles desconectan el motor convencional durante los estacionamientos, mientras que a la hora de reanudar la marcha, es un alternador reversible el encargado de arrancar el motor. Para ello emplea parte de energía recuperada de manera previa a la detención. Por la presente razón, solamente ahorra durante los ciclos urbanos y no posee un motor eléctrico capaz de impulsar al coche.
- b) Semihíbridos: En este segundo grupo, el motor eléctrico proporciona asistencia al motor de combustión, trabajando como si de un generador de energía se tratase durante las frenadas. Sin embargo, el automóvil no posee la capacidad de desplazarse completamente de forma eléctrica, aunque puede impulsar las piezas mecánicas del motor térmico.
- c) Híbrido puro: En determinadas ocasiones, esta clase de automóvil puede circular exclusivamente con el motor eléctrico, mientras que el de combustión interna esté totalmente en reposo.
- d) Híbrido enchufable (PHEV): Esta clase de híbridos posee baterías recargables mediante energía eléctrica convencional, es decir, a través de la red. De esta manera es capaz de recorrer una cierta distancia sin necesidad de emplear otro sistema de propulsión.
- e) Híbrido eléctrico de rango extendido (EREV): Se trata de un híbrido en serie, considerado como un vehículo eléctricos, debido a que únicamente emplean un motor térmico para sostener la carga, pudiendo funcionar sin ellos. De esta manera, cuando se descargan las baterías, el motor de combustión interna se encargan de generar energía eléctrica a régimen constante.

3.22.-Combustibles empleados a día de hoy en los motores de combustión interna.

Tras haber estudiado los diferentes componentes de los motores de combustión interna, de mayor empleo en la actualidad, se va a proceder al estudio de los diferentes combustibles convencionales, con sus respectivas características y medios de producción.

Antes de comentar, se han de haber aclarado dos de los conceptos básicos más importantes dentro de los combustibles convencionales. Se tratan del número de Octano y del número de Cetano, los cuales van a ser explicados en los siguientes apartados.

3.22.1.-Número de Octano, poder antidetonante de los combustibles.

A la hora de obtener una correcta combustión en un motor de combustión interna de encendido mediante chispa, el combustible ha de contener aptitudes para soportar sin detonar, elevadas compresiones. Cuando ello ocurre, se dice que se encuentra dotado de un elevado poder antidetonante, cuya medida viene proporcionada por el denominado Número de Octano. Dicho valor para un carburante, se obtiene mediante el método comparativo frente a combustibles de referencia, constituidos por mezclas de isoctano (C₈H₁₈) en la serie isoparafínica, y frente a heptano (C₇H₁₆). También se puede realizar la comparación con isoctano y tetraetilo de plomo ((CH₃CH₂)₄Pb).

Al isoctano de óptima capacidad antidetonante, se le asigna convencionalmente el número de octano 100, mientras que al heptano de la serie parafínica que posee cualidades antidetonantes muy bajas, el 0. Al ser mezclados ambos combustibles en diversas proporciones, se obtienen las diferentes mezclas con todos los números de octanos posibles entre ambos valores.

La determinación del número de octano en un carburante, se realiza mediante una serie de motores contruidos en serie, según unas determinadas prescripciones de pruebas, actualmente normalizadas. Se tratan de motores mono cilíndricos, los cuales nos permiten variar la relación de compresión durante su funcionamiento. En sucesivas pruebas, se determina la mezcla de isoctano y heptano que para un mismo valor en la relación de compresión, posea la misma intensidad de detonación que el combustible de ensayo. El porcentaje de isoctano en la mezcla, representa en número de octano en el combustible. (15) Así por ejemplo, el combustible que posea la misma intensidad de detonación que una mezcla compuesta por un 80% en volumen de isoctano y un 20% de heptano, contiene un número de octano de 80.



Figura 77: Motores mono cilíndricos en serie, empleados para la determinación del número de octanaje en combustibles.

Fuente: www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx

El número de octano en los combustibles, puede elevarse con la mezcla en pequeñas proporciones, con ciertas sustancias antidetonantes, tales como tetraetilo de plomo o tetrametilo de plomo, apenas empleadas en la actualidad. Por otro lado, las gasolinas sin plomo, contienen una mayor proporción de hidrocarburos con cadena ramificada, tales como el trimetil butano (C₇H₁₆) o el éter metilterbutílico MTBE (C₅H₁₂O), el cual actúa a su vez como agente antidetonante y oxidante, reduciendo la cantidad de hidrocarburos sin reaccionar y el monóxido de carbono (CO) en el escape.

3.22.2.-Número de Cetano, facilidad de ignición.

En un motor de combustión interna de ignición por compresión, desde el momento en el cual el combustible es inyectado en la cámara de combustión, hasta que la ignición es producida, transcurre un corto periodo de tiempo, denominado retraso en el encendido. Cuanto mayor sea dicho periodo, mayor resultará a su vez la cantidad de combustible acumulado en el interior de la cámara de combustión, hasta que la reacción de su comienzo. Por ello, se desarrolla de un modo repentino y en tal medida, que causa un gradiente de presión tan fuerte, que da lugar a un golpe, es decir, en el caso del motor Diesel, se observa un efecto similar al causado por la ignición en el motor por chispa. Un combustible, es tanto mejor cuanto menor es el retraso al encendido que se genera en el motor, siendo equivalente a una buena facilidad de ignición. Para poseer esta cualidad, los combustibles empleados en motores de combustión interna de encendido por compresión, han de contener características opuestas a los empleados en los motores de encendido por chispa.

En tanto a la valoración del grado de ignición en un determinado combustible, se realiza la comparación directa, con un combustible de referencia, en un motor específico de pruebas. La medida sobre la facilidad de encendido, viene expresada generalmente mediante el Número de Cetano.

El cetano, C₁₆H₃₅, se trata de un hidrocarburo parafínico, que posee una alta facilidad de ignición, al cual se le ha asignado un valor en el número de cetano igual a 100. Al mismo, se le mezcla con el alfa metilnaftaleno, un hidrocarburo de escasa facilidad de ignición y con una

asignación el número de cetano igual a 0. Al ser mezclados ambos combustibles en diversas proporciones, se obtienen las diferentes mezclas con todos los números de cetano posibles entre ambos valores.

A continuación, se expone una gráfica que nos muestra la relación entre el número de cetano y el número de carbonos, en algunos de los elementos más empleados, en la cual se puede observar que éste aumenta a mayor cantidad de átomos de carbonos.

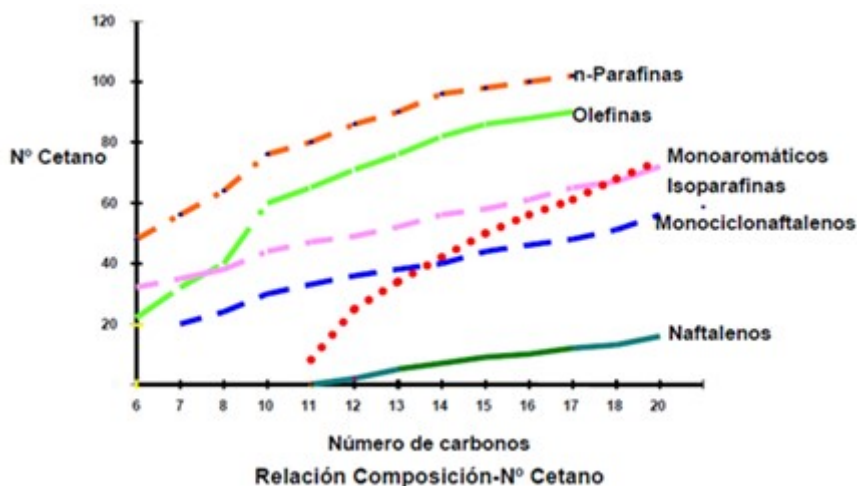


Figura 78: Relación entre el número de carbonos y número de cetano.

Fuente: www.ingmecanicamc.blogspot.com

La determinación del número de cetano en un combustible, se realiza mediante una serie de motores contruidos en serie, al igual que para el cálculo del número de octano, según unas determinadas prescripciones de pruebas, actualmente normalizadas. Se tratan de motores mono cilíndricos, los cuales nos permiten variar la relación de compresión durante su funcionamiento. En sucesivas pruebas, se determina la mezcla de cetano y alfa metilnaftaleno, que para un mismo valor en la relación de compresión, posea la misma intensidad de detonación que el combustible de ensayo. El porcentaje de cetano en la mezcla, representa en número de cetano en el combustible. (16) Así por ejemplo, el combustible que posea la misma intensidad de detonación que una mezcla compuesta por un 79% en volumen de cetano y un 21% de alfa metilnaftaleno, contiene un número de cetano de 79.

Un combustible, debe de cumplir con ciertos requisitos para poder ser empleado en un motor, ya que deben de proporcionar ciertas propiedades para hacerlos aptos en los distintos regímenes de marcha y en las diferentes condiciones ambientales.

3.22.3.-Combustibles líquidos y gaseosos.

Los combustibles que a temperaturas y presiones ordinarias son gaseosos, están constituidos por hidrocarburos de la serie parafínica y oleofínica de estructura simple (tales como el metano y el etileno).

1. Metano: CH₄
2. Etileno: C₂H₄.

El gas natural, consiste en una mezcla de metano, en torno al 95%, etano y una pequeña cantidad de propano, siendo empleado en tanques o botellones a presiones del orden de los 200kg/cm². (18) Se le denomina con la nomenclatura de GNC, conteniendo una condición natural antidetonante de entre 120 a 130 octanos, sin necesidad de aditivos tóxicos de plomo orgánico, benceno u otros muy cuestionados, los cuales son contenidos en las naftas.

Los gases permanentes, son considerados al metano natural o artificial, al gas de coque y al gas de alumbrado, siendo estos dos últimos de bajo poder calorífico, por lo que se han dejado de emplear en la actualidad.

Los combustibles de mayor empleo en la actualidad, son los que se encuentran en estado líquido, destacando los hidrocarburos obtenidos de la refinación del petróleo crudo, además del benzol y los alcoholes.

En específico, la nafta o gasolina, se encuentra compuesta por hidrocarburos de todas las series, mencionadas a continuación (19):

Tabla 5: Hidrocarburos que componen la nafta.

1. Parafínica o alifática: Se trata de hidrocarburos saturados con alta estabilidad.
2. Oleofínica: De similares características a las parafínicas, con la diferencia de no encontrarse saturadas y poseer menos estabilidad.
3. Nafténica: Se componen de hidrocarburos saturados, que tienden a su composición estable.
4. Aromática: Son cadenas de hidrocarburos no saturados, con la especialidad de proporcionar una alta estabilidad dentro de los hidrocarburos no saturados.

Procedentes de moléculas de peso molecular creciente, aparecen el gasoil y el petróleo pesado, con un peso específico es mayor y un decrecimiento importante en su volatilidad.

Los combustibles, según su composición poseen diferente capacidad de evaporación y por lo tanto diferente capacidad de mezclarse con el aire. Los que poseen alta facilidad de mezcla, se denominan carburantes y son los más empleados actualmente en motores de combustión interna de encendido por chispa, mientras que los menos carburantes se emplean en motores de compresión interna de encendido por compresión.

A continuación, se procede a estudiar uno por uno, los diferentes tipos de combustibles de mayor empleo en la industria del automóvil a día de hoy, junto con sus métodos de obtención.

3.22.4.-Principales combustibles convencionales.

3.22.4.1.-Gasolina.

Se tratan de los primeros combustibles líquidos obtenidos tras el fraccionamiento del petróleo. Presentan gran variedad de componentes hidrocarbonados, desde C₄ a C₁₀, en cuyas cadenas se encuentran entre cinco y diez átomos de carbono, formando diferentes compuestos, tales como parafinas normales o ramificadas, ciclo-parafinas o ciclo-bencenos, entre otros, con diferentes porcentajes. Sin embargo, la fracción principal ha de estar formada por pocos componentes y por muchas ramificaciones, las cuales son las encargadas de incrementar el octanaje. A su vez, las temperaturas de destilación poseen un rango muy variado, debido a que puede rondar desde los 30 a los 200°C.

De acuerdo a la procedencia del crudo, las fracciones de gasolina pueden variar la ramificación en sus compuestos y por consiguiente su composición. Sin embargo, para una determinada clase de gasolina, la cantidad relativa de sus compuestos individuales poseen la misma magnitud y la relación entre el contenido en parafinas normales y ramificadas, generalmente tiene un valor constante.

Generalmente, los principales componentes en el interior de una fracción de gasolina son las parafinas, bien normales o ramificadas; el ciclo-pentano; los ciclo-hexanos; el benceno y sus derivados. De acuerdo al porcentaje de dichos compuestos, las gasolinas pueden estar clasificadas en tres grupos.

- a) Gasolinas naturales: Son aquellas producidas por la separación del gas natural o del gas de la cabeza del pozo. Por lo tanto, su composición varía con respecto al gas natural que lo acompaña y su contenido en hidrocarburos es menor que en otros tipos de gasolinas.
- b) Gasolinas de destilación directa: Esta clase de gasolinas se obtienen al destilar el crudo del petróleo a presión atmosférica. Se caracterizan por no contener hidrocarbonados no saturados de moléculas aromático-nafténicas, debido a que presentan puntos de ebullición más elevados que el límite superior en el intervalo de evaporación en las gasolinas.
- c) Gasolina de cracking o refinado: Este tipo de gasolinas, se forman a partir de una fracción de elevado corte, sometido a un proceso de craqueo, en el cual se fracturan las moléculas más grandes en otras más pequeñas. De esta manera, se obtienen moléculas que entran dentro de la fracción de la gasolina. Por dicha razón, su composición ya no va a ser tan homogénea con en las dos anteriores, dependiendo de la composición inicial y del proceso empleado.

Las gasolinas empleadas en los motores de combustión interna, deben poseer cuatro propiedades fundamentales, su volatilidad, su curva de destilación, su número de octano y su contenido en azufre (S). Para asegurar una importante volatilidad, se han de tener en cuenta tanto las propiedades, como la composición del combustible; un adecuado diseño en el motor y unos óptimos materiales de fabricación. Esto es debido a que su funcionamiento dentro de un motor, depende del diseño de éste y de la composición de la gasolina, con la finalidad de incrementar su potencia y su rendimiento. Para que esto se cumpla, la gasolina que sale directamente de la destilación necesita un tratamiento posterior, en el cual se deben añadir una serie de aditivos. Su combustión es como la de cualquier combustible líquido, en el cual se va a generar calor y a desprender gran cantidad de energía. A continuación se procede a tratar sus principales parámetros.

El número de octano, tratado anteriormente, es la principal propiedad, debido a que está altamente relacionada con la eficiencia en el motor. Se trata de un parámetro que mide su calidad antidetonante, es decir, su habilidad para iniciarse sin causar detonación alguna. La gasolina puede tener un número de octano comprendido entre 90 y 100 dependiendo del tipo.

Por otra parte, su volatilidad es muy elevada, por lo que representa de forma indirecta su contenido en materias volátiles, las cuales brindan la seguridad durante su transporte y su almacenamiento. Esta propiedad es medida como la presión de vapor, la cual posee un valor de entre los 0,7 y los 0,85mm de mercurio (Hg).

En cuanto a su contenido en azufre (S), si esta cantidad sobrepasa el valor establecido por la normativa vigente, la gasolina puede tener efectos corrosivos sobre las partes metálicas del motor y sobre los conductos en el sistema de escape. No se ha de olvidar, su relación con los efectos nocivos sobre el medio ambiente, ya que se trata de un importante factor sobre la producción de lluvia ácida.

Mediante la curva de destilación (ASTM), se relaciona la composición de la gasolina, con su volatilidad y con su presión de vapor. De esta manera, se considera que a un 10% de la destilación, con una temperatura de ebullición inferior a 70°C, se asegura la presencia de componentes volátiles para un fácil arranque en frío. A continuación, a un 50% de su destilación, con una temperatura de ebullición inferior a 140°C, se asegura una volatilidad correcta y una máxima potencia durante la aceleración del motor. Finalmente, a un 90% y a un 100% de su destilación, para temperaturas de 190°C y 225°C respectivamente, se evitan tanto depósitos en el motor como una dilución del aceite. De esta manera, se proporciona un buen rendimiento del combustible.

Esta clase de combustible, además de ser un líquido inflamable, incoloro y con una densidad relativa de 0,7 a 0,77 menor a la del agua (H₂O), posee un gran poder antidetonante, el cual es medido mediante el índice de octano. La gasolina se caracteriza por proporcionar al motor del vehículo un arranque sencillo en frío, una máxima potencia durante su aceleración, la falta de dilución del aceite y un funcionamiento silencioso bajo las condiciones de funcionamiento en el motor. Todo esto es debido a sus eficientes propiedades sobre el octanaje y la volatilidad.

Actualmente como se ha mostrado, existen numerosas clases de gasolinas en función de su número de octano, por cual debe emplearse aquella que sea más apropiada para motor que utilice el vehículo. Cuanto mayor sea su relación de compresión, mayor tiene que ser el octanaje de la gasolina, ya que en el caso de emplear una gasolina de menor número de octanos que el adecuado, se genera un fenómeno de pre-encendido con una brusca expansión. Fundamentalmente en automoción, se emplean dos tipos de gasolinas, la de 95 octanos y la de 98 octanos.



Figura 79: Gasolinas de 95 y 98 octanos.

Fuente: www.desguacesvehiculos.es

Básicamente, su diferencia se encuentra en el refinado de ambas gasolinas, ya que la de 98 octanos se encuentra mejor tratada químicamente, por lo que posee un menor contenido en azufre (S) y una mayor cantidad de aditivos que alargan la vida del motor. A efectos prácticos, tomando de base a un mismo propulsor, la gasolina de 98 hará que el motor tenga un mejor rendimiento y un menor consumo, por lo que se emplea en vehículos deportivos que buscan un mayor aprovechamiento de su potencia.

Sin embargo, normalmente todos los automóviles accionados por gasolina aceptan ambos tipos de octanaje, por lo cual, en coches convencionales de una menor potencia, se suele emplear la gasolina de 95 octanos ya que es de un menor coste económico, facilita el arranque en frío y posee un menor peso al ser de menor densidad. A pesar de estas propiedades, el fabricante para cada modelo de vehículo recomendará una u otra en función de las características del motor. En la siguiente tabla, se muestran las propiedades más significativas de la gasolina (los datos han sido realizados mediante una media ponderada de los diferentes tipos de gasolinas comerciales, más empleadas en la actualidad en automoción).

Tabla 6: Principales propiedades de la gasolina.

1. Densidad.	0,727g/cm ³ .
2. Poder calorífico inferior.	43,20MJ/kg.

3. Densidad volumétrica.	32,18 MJ/l.
4. Emisiones de gases contaminantes.	73,38 g/MJ.
5. Intervalo de ebullición.	33-221°C.
6. Punto de inflamación mínimo.	46°C.

En cuanto a su correlación con el medio ambiente, en esta clase de motores de combustión, a través de su tubo de escape se expulsan a la atmósfera numerosas sustancias que contribuyen a su contaminación. Fundamentalmente se tratan de hidrocarburos no quemados debido a combustiones incompletas, óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y otros aditivos que componen dicho combustible. A la hora de reducir estas emisiones, se ha de incorporar en el interior de los vehículos un catalizador, el cual facilita la transformación de las sustancias contaminantes en otras menos contaminantes. De esta manera, se logra reducir hasta un 85% de éstas emisiones.

Sin embargo, para el uso de catalizadores, se ha tenido que eliminar el plomo (Pb) contenido en la gasolina, ya que éste los inutiliza, siendo esto un problema, debido a que era el aditivo antidetonante que se le añadía a la gasolina para alcanzar su valor necesario.

El uso del plomo (Pb), conlleva varios problemas, al tratarse de un elemento sumamente nocivo para los seres vivos o al inutilizar los catalizadores empleados para incrementar la combustión completa y así poder evitar la formación de monóxido de carbono (CO). Por estas razones se ha sustituido el plomo (Pb) por otras sustancias antidetonantes, tales como el MTBE.

3.22.4.1.1.-Obtención de la gasolina.

Entre los diversos productos que son obtenidos tras la destilación del crudo del petróleo, el de mayor empleo a nivel industrial es la gasolina, debido a que es el combustible para transporte que más ampliamente se utiliza a nivel global. Sin embargo para entregar el producto a los consumidores de acuerdo a los requisitos y a las condiciones establecidas, es necesario el empleo de diversos procesos. (23)

El crudo del petróleo, fuente de la cual se obtiene la gasolina, contiene otra serie de compuestos que no son hidrocarburos, tales como sales, metales o azufre (S). El contenido de este último, varía de acuerdo al origen del crudo, pero se puede decir que la gasolina obtenida tras la destilación primaria, contiene alrededor de 800 ppm peso de este elemento. Tras la destilación del crudo, se obtienen gasolinas que solamente alcanzan un número de octano de próximo a 57, siendo la especificación del producto final superior de 95 o 98, como se ha explicado. Para alcanzar dicho octanaje, la gasolina primaria se ha de enviar hacia un proceso de reformado catalítico, pero antes debe ser desulfurada mediante hidrotratamiento en presencia de un catalizador, cuyos metales activos pueden ser cobalto (Co) y molibdeno (Mo).

El presente proceso de hidrotratamiento, consiste en calentar la gasolina hasta los 280°C, junto con una corriente de hidrógeno (H₂), para a continuación hacerlos atravesar un lecho fijo donde se encuentra el catalizador, el cual permite remover el azufre (S). De esta

manera, se logra reducir dicho elemento hasta las 0,1ppm. Una vez en estas condiciones, la gasolina se encuentra preparada para someterla a un proceso de reformado.

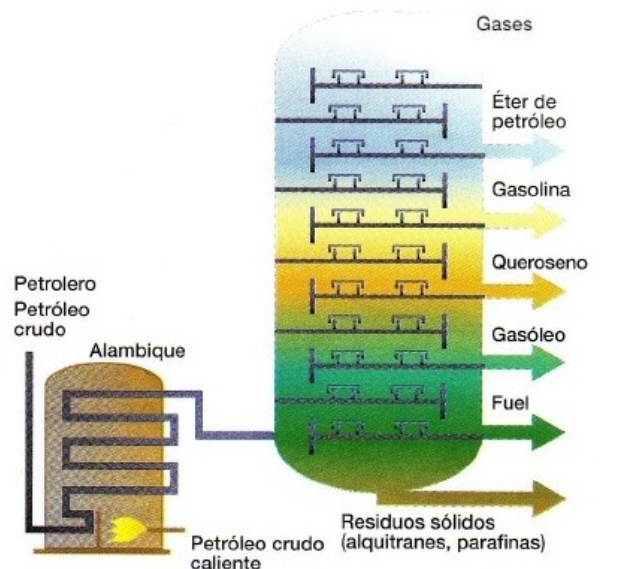


Figura 80: Esquema de una torre de destilación del crudo del petróleo.

Fuente: www.corinto.pucp.edu.pe

Para llevar a cabo el reformado, es necesario incrementar su temperatura hasta los 480°C y hacerla pasar a través de cuatro lechos fijos de un catalizador de platino (Pt), como principal metal activo. La razón de hacerla atravesar por varios lechos catalíticos, es que en cada lecho se llevan a cabo diferentes reacciones químicas, las cuales transforman diferentes familias de hidrocarburos. A su vez, después de atravesar cada lecho, es necesario volver a elevar su temperatura, debido a que las reacciones son endotérmicas. Tras este proceso se pueden alcanzar octanajes cercanos a los 100, pero sin embargo, su valor se ha de ajustar de tal manera, que el octano en la refinería se encuentre proporcionado de acuerdo a las cantidades de gasolinas que se tengan programadas generar.

Además de este método de producción de gasolinas, existen otras fuentes y otros procesos para dicha finalidad, como por ejemplo el proveniente del proceso de desintegración catalítica fluida (FCC). Durante este mecanismo, a partir de una corriente de gasóleos de vacío mezclados con gasóleo pesado primario, se produce un rompimiento en las moléculas de hidrocarburo, mediante elevadas temperaturas (515°C) y un catalizador a base de alúmina y zeolita. De esta manera, se obtienen una gama de productos que van desde metano (CH₄) y etano (C₂H₆), hasta aceites decantados, gas licuado, olefinas de cuatro a cinco átomos de carbono, gasolina y aceite cíclico ligero.

Esta gasolina catalítica, posee un octanaje que ronda los 90, por lo que se trata de un excelente componente, salvo por su contenido de azufre (S), el cual es elevado. Por esta razón, limita su proporción en la gasolina final en función del valor límite especificado por la vigente legislación, de acuerdo a este contaminante.

A raíz de suprimir el plomo (Pb) como método de incrementar el octano en las gasolinas, se tuvo la necesidad de buscar otros compuestos que cumplieran dicha función, tales como los éteres. Su producción, va en función de que la materia prima para producirlos, es obtenida a partir del proceso de FCC.

De esta forma, las olefinas de cuatro átomos de carbono, reaccionan con metanol (CH₄O), para así obtener el MTBE, el cual posee 118 octanos en el parámetro RON y 102 octanos en el parámetro MON. Por otra parte, las olefinas de cinco carbonos reaccionan a su vez con el metanol (CH₄O), para así producir el TAME, el cual tiene el mismo número de MON que el anterior, pero con un RON de 115.

Por otra parte, para producir gasolinas menos contaminantes, se emplean plantas de alquilado, en las cuales la carga son las olefinas de cuatro carbonos que no reaccionaron en la planta de MTBE, junto con una corriente de isobutano (C₄H₁₀) proveniente del proceso de FCC. El producto obtenido puede contener un número de octano de 90 o 91 en el valor de RON y un 88 o 89 para el valor de MON.

A continuación, con la finalidad de aprovechar óptimamente los hidrocarburos, se utilizan unidades de isomerización de parafinas de cinco a seis carbonos, en las cuales se producen corrientes empleadas para la preparación de las gasolinas finales.

Finalmente con este conjunto de procesos, se obtienen las gasolinas finales con sus respectivas características, y especificaciones tanto técnicas como legislativas, listas para poder ser utilizadas en los motores de combustión interna de encendido por chispa.

3.22.4.2.-Gasóleo.

Se trata de un combustible líquido de elevada calidad, obtenido como un producto intermedio en la columna de destilación atmosférica del petróleo. Hoy en día existen tres principales tipos de gasóleo, los cuales se encuentran denominados por las letras A, B y C. En la automoción, se emplea el gasóleo A para motores de ignición por compresión, el decir los que trabajan con un ciclo Diesel. Para esta clase de combustible, la vigente normativa UNE-EN 590, establece que el número de cetano sea superior a 51.

Fundamentalmente, consiste en una compleja mezcla de hidrocarburos, compuesta por parafinas y aromáticos, junto con un contenido de olefina que alcanza solamente un pequeño porcentaje por unidad de volumen. El número de carbonos que lo forman se encuentran en su mayor parte, dentro del intervalo de C₉ a C₂₀, con un punto de ebullición que posee un rango de entre los 250 hasta los 360°C.

Por la simple razón de que el petróleo no es un producto manufacturado, su composición no es del todo exacta. Por lo tanto, de manera teórica, se suelen emplear como fórmula química en el gasóleo C₁₂H₂₃, la cual puede variar de acuerdo a su composición desde C₁₀H₂₀, hasta C₁₅H₂₈.

Sus propiedades han hecho de éste, hasta día de hoy, un combustible que junto a la gasolina, forman un monopolio de combustibles en el ámbito del transporte. Sus principales

diferencias respecto a la gasolina son su elevada masa molecular, su alta densidad y su menor volatilidad.

Físicamente, se trata de un líquido viscoso, con un color rojizo que tiende a ser transparente, mientras que sus propiedades químicas más relevantes, las cuales definen su empleo en motores de combustión interna, son el número de cetano y la viscosidad. En cuanto al número de cetano, como ya se estudió anteriormente, a la hora de obtener un importante funcionamiento dentro de un motor Diesel, se necesita de una ignición rápida por parte del combustible a medida que éste va entrando en contacto con el aire en la cámara de combustión. Para cuantificar esta sensibilidad de ignición, se emplea un parámetro definido por la nomenclatura NM, por el cual si éste no es lo suficientemente elevado, se incrementa el tiempo ante la ignición. Esto provoca un aumento no deseado en la presión en el cilindro.



Figura 81: Aspecto físico del gasóleo diesel A.

Fuente: www.wccftech.com

Por otro lado, tratando sobre su viscosidad, su disminución facilita la pulverización por parte del combustible, pero sin embargo, si su valor es demasiado bajo no se logra lubricar adecuadamente en la bomba de inyección. A su vez, su empleo en motores de encendido por compresión, requiere de una elevada lubricidad, una alta facilidad de autoencendido y también ha de tener una facilidad de vaporización dentro del cilindro.

A continuación se propone una tabla con los parámetros más importantes de este combustible (los datos han sido realizados mediante una media ponderada de los diferentes tipos de gasóleos comerciales, mas empleados en la actualidad en automoción).

Tabla 7: Principales propiedades del gasóleo.

1. Densidad.	0,840 g/cm ³ .
2. Poder calorífico inferior.	43,10 MJ/kg.
3. Densidad volumétrica.	35,86 MJ/l.

4. Emisiones de gases contaminantes.	73,25 g/MJ.
5. Intervalo de ebullición.	250-360°C.
6. Punto de inflamación mínimo.	55°C.

Uno de los puntos a destacar, el cual plantea la diversificación de los diferentes combustibles tradicionales, es el comportamiento medioambiental. El empleo del gasoil en motores alternativos de combustión interna, genera elevadas emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de partículas sólidas en suspensión, las cuales degradan negativamente la calidad atmosférica y afectan a la salud. A su vez, dichas partículas sólidas en forma de hollín, son las responsables del humo negro que desprenden los tubos de escape debido a combustiones incompletas y del dióxido de azufre (SO₂) procedente del azufre (S) contenido en el gasóleo.

3.22.4.2.1.-Obtención del gasóleo.

En una refinería, como se ha visto en el apartado anterior de la gasolina, el crudo del petróleo es transformado en una gran variedad de productos a partir de proceso tanto físicos, como químicos.

En una primera etapa, se somete al petróleo a un proceso de destilación, para así poder separarlo en diferentes fracciones. La sección de destilación es probablemente la unidad más flexible en una refinería, debido a que las condiciones de operación pueden ser ajustadas, para a continuación procesar un amplio intervalo de alimentaciones. Dichas alimentaciones pueden ir desde crudos ligeros, hasta otros más pesados.

En el interior de las torres de destilación, tanto los líquidos como los vapores, son separados en fracciones de acuerdo a su peso molecular y a su temperatura de ebullición. Las fracciones más ligeras, incluyendo gasolinas y los gases licuados del petróleo, vaporizan y ascienden hasta la parte superior de la torre, donde se produce su condensación. Por otra parte, los líquidos medianamente pesados, como el queroseno o la fracción diesel, se depositan en la parte media de la torre. Por último, los líquidos más pesados y los gasóleos ligeros primarios, se separan en la parte inferior, mientras que los más pesados en el fondo.

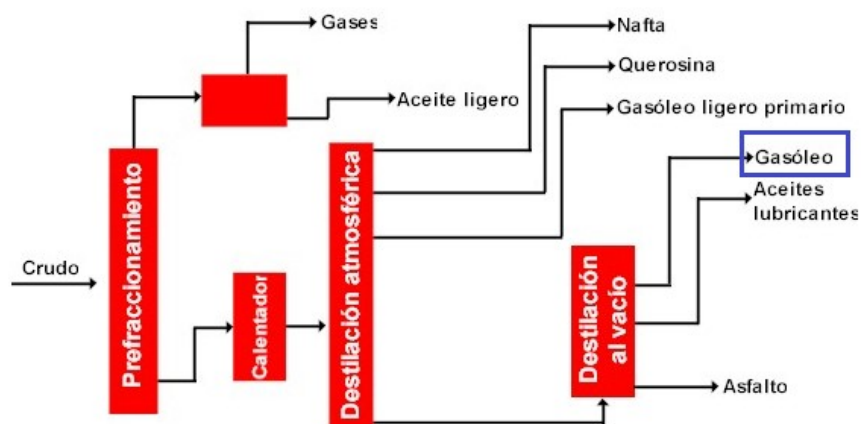


Figura 82: Esquema del proceso de obtención del crudo.

Fuente: www.ref.pemex.com

Por una parte, las gasolinas contienen fracciones con puntos de ebullición inferiores a los 200°C, mientras que en el caso del diesel, sus fracciones poseen un límite que ronda los 350°C. A su vez, el gasóleo diesel, también se manufactura a partir de mezclas de gasóleos con querosenos y aceite cíclico ligero, el cual se trata de un producto del proceso de desintegración catalítica fluida.

Años atrás, la manufactura de gasóleo diesel, implicaba utilizar los restos sobrantes tras remover los productos valiosos del petróleo. Sin embargo, hoy en día el proceso de fabricación de dicho combustible es muy complejo, ya que requiere escoger y mezclar las diferentes fracciones del petróleo, para así poder cumplir las especificaciones precisas, a través de un estricto control en los laboratorios. (24)

3.22.4.3.-Gas natural comprimido como alternativa frente a los combustibles convencionales.

Se trata de una fuente de energía no renovable, la cual se encuentra compuesta por una mezcla de gases ligeros que se pueden situar bien disueltos o asociados con el petróleo, o bien en depósitos de carbón. A pesar de que su composición puede variar en función del yacimiento del que se extrae, básicamente está formado por metano (CH₄) en cantidades que rondan un 90%, junto con otros gases tales como nitrógeno (N₂), dióxido de carbono (CO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), helio (He) y mercaptanos. A su vez, puede obtenerse también a partir de diferentes procesos de descomposición de restos orgánicos en plantas de tratamiento. Al gas producto se le denomina biogás.

Es considerado como el primer miembro de la familia de los alcanos, ya que en condiciones atmosféricas se presenta en forma de gas. Debido a que su composición varía en función de la procedencia del yacimiento, sus propiedades pueden ser variadas, pudiendo ser

considerado húmedo, en caso de contener hidrocarburos líquidos en suspensión, o por el contrario seco.

Su importancia como carburante, radica tanto en la proporción de metano (CH₄) que contiene, como en sus demás hidrocarburos superiores, ya que le confieren su carácter como combustible. El resto de componentes no intervienen en la combustión, pero pueden ser como perjudiciales, por lo que es necesaria su eliminación. Por otro lado, este gas no es corrosivo ni tóxico, debido a que posee una temperatura de combustión elevada, junto con un estrecho intervalo de inflamabilidad, dando lugar a un combustible seguro.

Físicamente, en su estado natural, no posee ni olor, ni color, ni sabor, siendo más ligero que el oxígeno (O₂). Su punto de ebullición ronda presenta en forma gaseosa a una temperatura superior a los -161°C y su densidad relativa es de 0,60g/cm³.

Para su empleo sobre los motores de combustión interna, son necesarias algunas modificaciones. En un primer lugar, la oxidación del metano (CH₄) en el catalizador requiere de elevadas temperaturas frente al uso de gasolina, por lo que el control del motor necesita ciertas adaptaciones. Para lograrlo, se han desarrollado ciertos modelos sobre los sistemas de inyección, tales como los de tipo fase, secuencial, multipunto o indirecta.

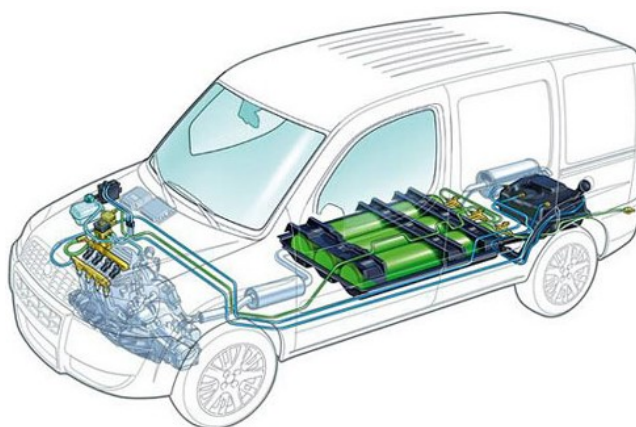


Figura 83: Esquema de un vehículo que funciona a base de gas natural comprimido.

Fuente: www.energiasorolla.wikispaces.com

También se ha de tener en cuenta el alto número de octanos de este gas, encontrándose por encima de los 130, por lo que se reduce el riesgo una posible detonación espontánea e incontrolada por parte combustible en el interior de los cilindros. Por esta razón, el motor puede ser diseñado para un mayor índice de compresión.

En cuanto a su comportamiento frente al medio ambiente, el gas natural es un combustible con un menor impacto medioambiental que los anteriores, tanto durante la extracción, como en la elaboración, en su transporte, o como en su fase de empleo. Por lo tanto, las consecuencias atmosféricas del uso del gas natural son menores que las de otros combustibles. Sin embargo, aún se generan ciertas emisiones de gases contaminantes (SO₂,

CO₂, NO_x y CH₄) por unidad de energía producida, frente al empleo de hidrógeno como combustible.

3.22.4.3.1.-Obtención del gas natural.

El proceso de obtención del gas natural, es un proceso bastante simple, el cual está compuesto fundamentalmente por estas tres etapas.

En un primer lugar se considera una etapa de exploración. Durante ésta, se ha de analizar la composición del suelo, mediante la comparación con muestras de otras zonas donde se ha encontrado gas natural con prioridad. De esta manera, se define si se trata de una zona con posibilidad o no, de encontrar gas natural. A continuación se deben de llevar a cabo una serie de análisis específicos, tales como el estudio de la formación de rocas a nivel del suelo, sobre las cuales se pudieron haber formado capas de gas natural.

En un segundo lugar, se extrae el gas mediante la perforación de la roca, la cual puede efectuarse tanto a nivel terrestre como marino. El equipamiento empleado puede variar de acuerdo a las características del yacimiento. Por ejemplo, en el caso de una perforación poco profunda, se puede utilizar perforación de cable, mientras que para prospecciones de mayor profundidad, se deben utilizar plataformas de perforación rotativa. Generalmente, el gas natural está sometido bajo presión, por lo que sale de un pozo sin intervención externa. Sin embargo, a veces es necesario usar bombas u otros métodos más complicados para su obtención.

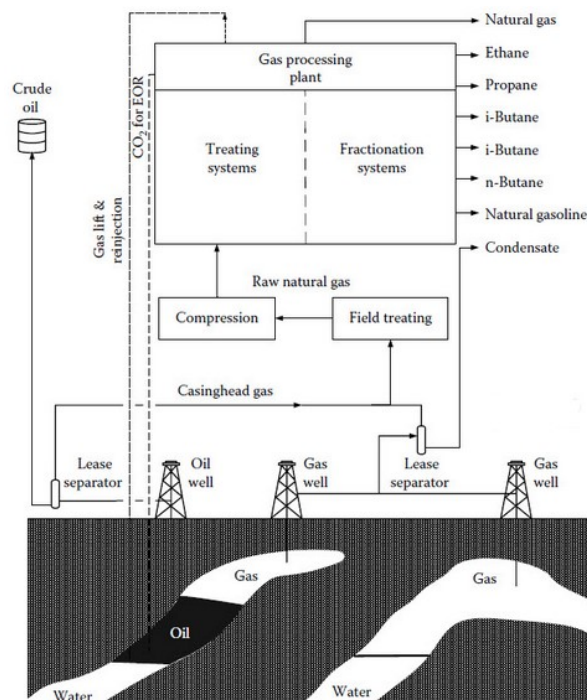


Figura 84: Esquema de obtención del gas natural comprimido.

Fuente: www.avibert.blogspot.com

Parte de los gases que forman dicho combustible cuando es extraído, son separados debido a que no poseen capacidad energética alguna, tales como el nitrógeno (N₂) o el dióxido de carbono (CO₂), ya que pueden depositarse en las tuberías de distribución debido a su alto punto de evaporación.

Finalmente, el tratamiento del gas natural implica un reagrupamiento, seguido de un acondicionamiento y un refinado, con la finalidad de transformarlo en biogás. Para ello, en un paso inicial, se realiza una extracción de los elementos líquidos del combustible, para seguido poder someter a una separación a los diferentes elementos que componen los líquidos. Tras haber finalizado el proceso de tratamiento, éste es transportado mediante gasoductos o buques hacia la planta depuradora, donde a continuación es conducido hasta la red de gas o almacenado en depósitos. (25)

3.22.4.4.-Gases licuados del petróleo (GLP) como alternativa frente a los combustibles convencionales.

Se trata de una mezcla de un conjunto de hidrocarburos ligeros obtenidos a partir del proceso de refino del petróleo, los cuales están compuestos principalmente por butano (C₄H₁₀) y propano (C₃H₈) en proporciones variables. Estos porcentajes rondan un 60% de butano (C₄H₁₀) y un 40% de propano (C₃H₈). Poseen a presión atmosférica un punto de ebullición que alcanza los -17°C. Se almacenan y transportan en forma líquida, a pesar de que van acompañados de una cámara de fase gaseosa. Su alto índice de octano y su elevado poder calorífico, junto con el hecho de que a presiones de entre los 5 y los 15 bares se encuentren en estado líquido, hace que su uso como combustible líquido en vehículos sea empleado desde hace varias décadas. (25)

En su composición química, como ya se ha mencionado, predominan los hidrocarburos de butano (C₄H₁₀) y de propano (C₃H₈), los cuales contienen ciertas impurezas, tales como el propileno (C₃H₆) o el butileno (C₄H₈).

En cuanto a sus propiedades físicas, los gases licuados del petróleo no son tóxicos ni corrosivos, pero pueden generar desplazamiento del oxígeno (O₂), especialmente en espacios cerrados. Esto se debe a que no contienen plomo (Pb) o azufre (S) en su composición, siendo inodoros e incoloros, a pesar de que se les añaden sustancias que generan fuertes y desagradables olores.

Sin embargo, son más pesados que el aire atmosférico, por lo cual, en caso de fugas se extienden por la superficie y a través de los fosos de inspección. Otra de sus propiedades es que a la hora de licuarlos, se les somete a muy bajas temperaturas (por debajo de los 0°C), por lo que su contacto con la piel produce importantes quemaduras.

Esta clase de combustibles, son adecuados para los motores Otto, pero antes éstos han de realizar una serie de adaptaciones sobre el sistema de inyección. También se pueden emplear en motores diesel con una serie de modificaciones, utilizando catalizadores de tres vías, para poder reducir las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos no quemados, tras combustiones incompletas. (26)

Al emplear esta mezcla de hidrocarburos en vehículos destinados al transporte, se obtienen una serie de ventajas técnicas frente a otros combustibles fósiles, tales como el logro de una mezcla homogénea, la cual puede estar bien controlada y distribuida con el aire comburente en los cilindros, facilitando así una combustión más completa. Otra importante ventaja, consiste en que no generan ningún tipo de carbón en la cámara de admisión, por lo cual, la vida útil en las bujías se prolonga de manera importante y los aceites lubricantes en el motor se mantienen limpios durante más tiempo. Finalmente, también se logran mayores potencias y un mayor par motor a cargas parciales, es decir, durante los arranques, las aceleraciones o desaceleraciones y en las paradas. A su vez, los depósitos de almacenamiento dentro del vehículo, los cuales operan a presiones cercanas a los 7 bares, deben de incrementar su volumen, debido a que dan lugar a menores autonomías.

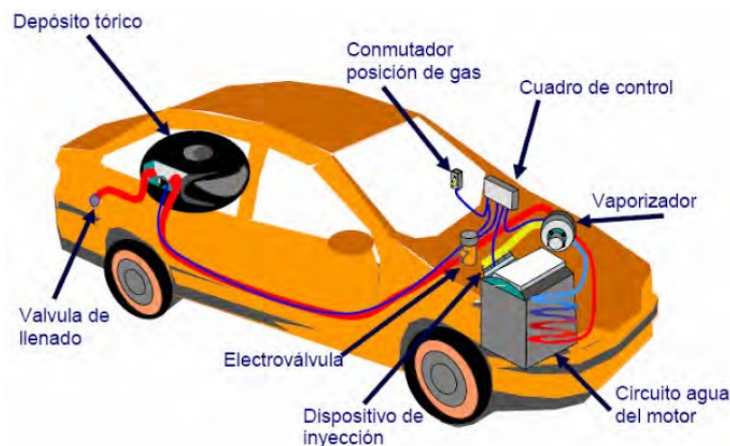


Figura 85: Modificaciones en un automóvil que trabaja con GLP.

Fuente: www.cincovalvulas.com

En cuanto a sus emisiones contaminantes, posee una baja tendencia a formar ozono troposférico, en torno a la mitad que con gasolina y además, apenas emiten poli-aromáticos y aldehídos. Su contaminación acústica se ve reducida en un 50%, en comparación con el diesel. A su vez, no genera emisiones de dióxido de azufre (SO₂), encargado junto con los óxidos de nitrógeno (NOx) de generar la lluvia ácida. Generalmente, las emisiones de monóxido de carbono (CO), de óxidos de nitrógeno (NOx) y de dióxido de carbono (CO₂), se reducen en comparación con otros combustibles fósiles. Aún así, estas dependen del modelo de motor empleado y del régimen de marcha por parte del conductor. Los vehículos que operan con esta tecnología, pueden reducir las emisiones en torno a los siguientes valores.

1. Durante su combustión, los vehículos de GLP generan un 15% menos de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que con la gasolina y un 10% menos que con gasóleo.
2. Durante su combustión, los vehículos de GLP generan un 5% de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) emitidas por un vehículo de gasóleo.

3. Durante su combustión, los vehículos de GLP generan un 40% menos en las emisiones de monóxido de carbono (CO) que en por un vehículo de gasóleo.
4. Durante su combustión, los vehículos de GLP generan un 99% menos en las emisiones de partículas (PM) que por un vehículo de gasóleo.

A pesar de esta serie de ventajas, los gases licuados del petróleo (GLP) siguen siendo una fuente de energía fósil, bien si se encuentra de modo natural formando parte del crudo o del gas natural, o si se produce artificialmente mediante procesos de refinación. Por ésta razón, su empleo como combustibles en automovilismo a grandes escalas depende de sus materias primas fósiles, dando lugar de esta manera a una importante dependencia, la cual se incrementaría, si dichos combustibles se situarían en cabeza en las próximas décadas, como vectores energéticos en el automóvil.

3.22.4.4.1.-Obtención de los gases licuados del petróleo (GLP).

Fundamentalmente existen dos fuentes de obtención de este combustible. Bien en las refinerías a partir de la destilación del petróleo (40%), o mediante las plantas de proceso de gas natural (60%). (26)

- a) Refinerías a partir del petróleo: Para su obtención, el crudo del petróleo se somete a una operación denominada destilación. A partir de este proceso, se van separando ordenadamente, de acuerdo a sus densidades y a sus puntos de ebullición, sus diversos componentes, tales como las gasolinas ligeras, los querosenos, el butano (C₄H₁₀), el propano (C₃H₈), el gasoil, el fueloil y aceites pesados. Los gases derivados que forman el grupo de los GLP, son el butano (C₄H₁₀), con un 40% y el propano (C₃H₈), con un 60%. Éstos se distinguen entre sí, debido a su composición química, su presión, su punto de ebullición y su poder calorífico. Finalmente, se ha de convertir el estado gaseoso en el que se encuentran a presión atmosférica, en estado líquido mediante compresión y enfriamiento. Para ello, se necesitan alrededor de 273 litros de vapor de GLP, para poder obtener 1 litro de GLP líquido.
- b) A partir del gas natural: A este proceso se le conoce con el nombre de licuefacción del GLP, en el cual, el gas natural, como se explicó anteriormente, está constituido por metano (CH₄), etano (C₂H₆), propano (C₃H₈), butano (C₄H₁₀), y otros hidrocarburos más pesados, junto con impurezas tales como el azufre (S). A continuación, dicho gas es enviado hacia las plantas de proceso, dónde en una primera etapa, la corriente de gas pasa a través de una planta endulzadora, para eliminar el azufre (S). Seguido, se introduce en una planta criogénica, en la cual mediante enfriamiento y una serie de sucesivas expansiones, se obtienen dos corrientes. Por una parte se forma una corriente gaseosa compuesta básicamente por metano (CH₄), mientras que por la otra parte se obtiene la corriente líquida, formada por los compuestos licuables. Posteriormente, tras un proceso de fraccionamiento, la fase líquida se separa en sus diferentes componentes, tales como el etano (C₂H₆), el gas licuado del petróleo y las

gasolinas naturales. Finalmente, para facilitar su transporte y su almacenamiento, el gas licuado del petróleo que se encuentra en estado gaseoso a condiciones normales de presión y temperatura, ha de ser licuado y almacenado a bajas presiones de entre los 5 y los 9 bares, para así poder mantenerlo en estado líquido. Dicho almacenamiento debe realizarse en tanques o depósitos especiales.

3.22.4.5.-El biodiesel como alternativa frente a los combustibles convencionales.

El biodiesel, es a día de hoy el biocarburante líquido más empleado en automoción, el cual es producido a partir de los aceites vegetales y grasas animales, entre los que destacan la colza, el girasol y la soja. Sus propiedades son prácticamente las mismas que las del gasóleo de automoción, en cuanto a densidad y número de cetano, junto un punto de inflamación superior. Por esta razón, el biodiesel se suele encontrar mezclado con el gasóleo para su uso en motores, e incluso lo reemplaza totalmente si se adapta de manera adecuada.

Generalmente, se describe a dicho combustible como un conjunto de esteres monoalquílicos de ácidos grasos con cadena larga, los cuales son derivados de lípidos renovables, tales como aceites vegetales o grasas de animales. Su empleo se da en motores de combustión interna de ignición por compresión.



Figura 86: Ciclo del biodiesel.

Fuente: www.ecointeligencia.com

Sin embargo, los esteres más empleados, son los de metanol (CH₄O) y los de etanol (C₂H₅OH), obtenidos a partir de la transesterificación de los aceites vegetales, de las grasas animales o de los ácidos grasos, debido a su bajo coste y sus ventajas tanto químicas como físicas.

En el empleo de este combustible para la automoción, también ha de resaltar que las características de los esteres son más semejantes a las del gasóleo, que las del aceite vegetal sin modificación alguna. Por ejemplo, su viscosidad es dos veces superior a la del gasóleo

frente a las diez veces más que para el aceite crudo. Además, el biodiesel necesita tener unas especificaciones garanticen tanto un calidad, como unos requisitos mínimos como combustibles para la automoción, los cuales se encuentran recogidos en la normativa vigente.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo de uno de estos proyectos, el cual se encuentra en desarrollo en el Centro para el Desarrollo Sostenible de Investigación de la Energía y el Desarrollo en la Universidad Federal de Paraná, Curitiba, Brasil. El sistema propuesto consiste en la integración de varios subsistemas de ingeniería. El objeto planteado fue demostrar que una instalación industrial podría operar con biocombustibles derivados de micro algas producidas localmente, tales como biodiesel, etanol o hidrógeno (H₂).

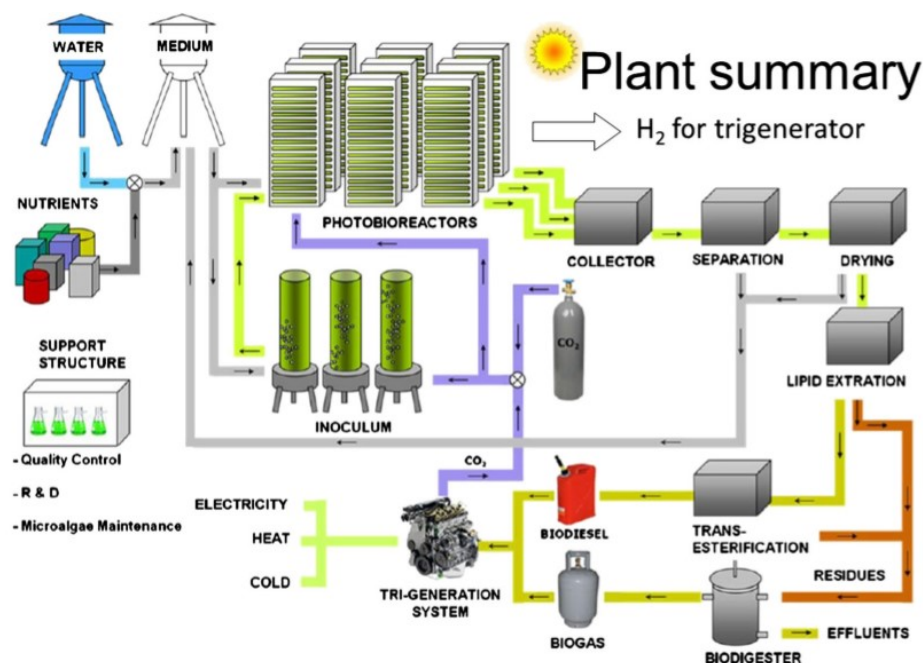


Figura 87: Planta de generación de biocombustible a partir de micro-algas.

Fuente: www.energiasrenovadas.com

Para ello, se emplean fotobiorreactores que trabajando con una alta densidad logran producir biomasa a través de micro-algas, seguido de una serie de operaciones tales como su cosecha, separación mediante centrifugación, secado y extracción de lípidos. Seguido, los sin grasa, hidrocarburos y proteínas ricos en residuos, son dirigidos hacia un biodigestor para transformarlos en biogás, mientras que los nitratos y otros efluentes ricos en fosfatos se emplean como nutrientes de las micro-algas en fotobiorreactor.

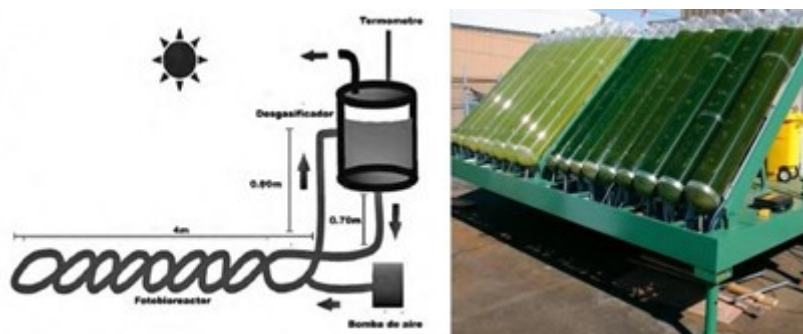


Figura 88: Esquema de un fotobiorreactor.

Fuente: www.revistas.unal.edu.co

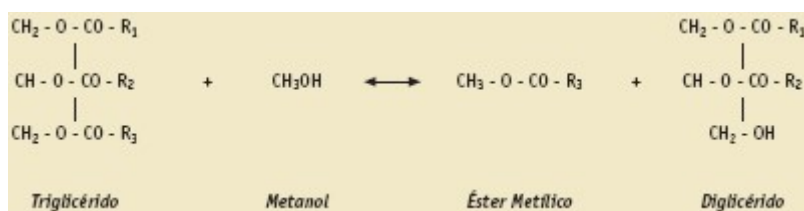
Sin embargo, la grasa residual, podría ser empleada para el etanol (C₂H₅OH), los complementos alimenticios y en la producción de piensos para animales. El aceite extraído es sometido a una reacción de transesterificación para la producción de biodiesel (ésteres etílicos). Se utiliza por tanto, el biodiesel y el biogás producido, para generar electricidad, calefacción y aire acondicionado, mientras que cuyas emisiones son utilizadas como fuente de dióxido de carbono (CO₂) en el crecimiento de las microalgas.

La producción de hidrógeno (H₂), también es posible extraerla directamente del fotobiorreactor, mediante el mecanismo de biofotólisis indirecta, es decir, se trata de una estrategia aeróbica y anaeróbica de ciclo intermitente. (27)

3.22.4.5.1.-Obtención del biodiesel.

Actualmente, podemos encontrar tres vías para la obtención del biodiesel a partir de las materias primas anteriormente tratadas. Éstas se explican a continuación.

a).-Transesterificación: Es el método más empleado en el proceso industrial de producción del biodiesel. Se encuentra compuesto por tres reacciones reversibles y consecutivas, en las cuales los triglicéridos son convertidos de manera consecutiva en diglicéridos, monoglicéridos y en glicerina, por lo que en cada una de estas reacciones se libera un mol de éster-metílico. Todo este proceso, es llevado a cabo en el interior de un reactor, en el cual se producen las reacciones, para a posterior continuar con las fases de separación, purificación y estabilización.



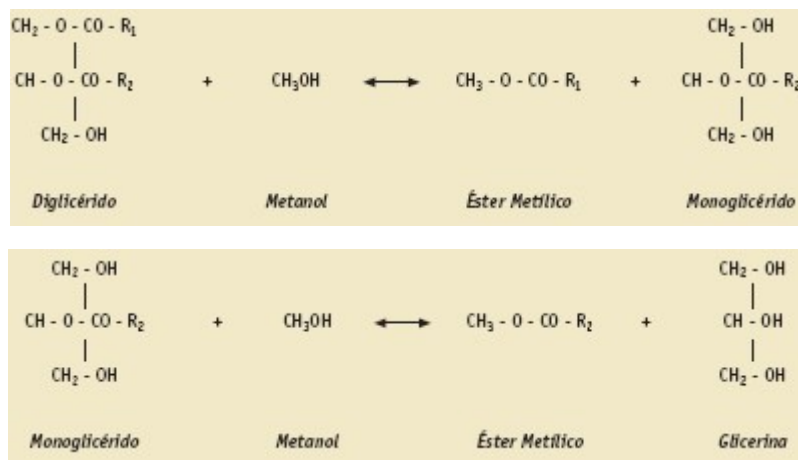


Figura 89: Reacciones ocurridas en el proceso de transesterificación.

Fuente: www.miliarium.com

Las tecnologías empleadas, pueden ser combinadas de diferentes maneras variando las condiciones del proceso y la alimentación del mismo. A su vez, la elección de la tecnología va en función de la capacidad deseada de producción, de su alimentación, de su calidad, de la cantidad recuperada de alcohol y del catalizador utilizado.

b).-Proceso discontinuo: Se trata del método más simple para la producción de dicho combustible, ya que se reportan ratios entre el alcohol y los triglicéridos del orden de 4/1. Para ello, se emplean reactores con agitación, donde éste puede estar sellado o equipado con un condensador de reflujo. La razón de emplear esta clase de reactores, es debido a la necesidad de una elevada agitación, para así obtener una correcta mezcla entre el aceite, el catalizador y el alcohol. A medida que la reacción progresa, la agitación disminuye, permitiendo al glicerol separarse de la fase éster.

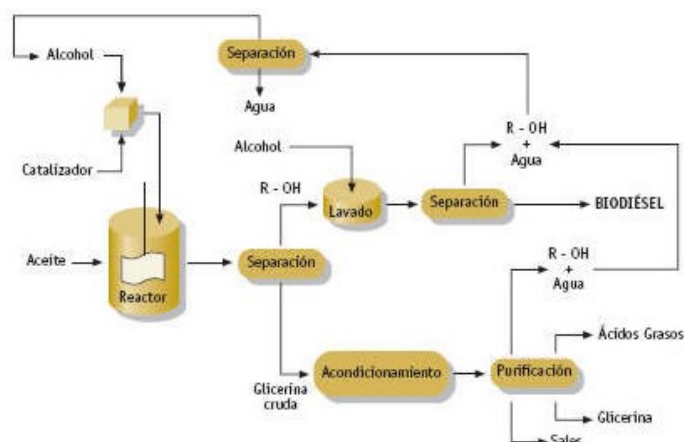


Figura 90: Esquema del proceso discontinuo.

Fuente: www.miliarium.com

Tras haber redactado un amplio análisis sobre los diferentes sistemas de propulsión convencionales en un vehículo y sobre sus combustibles, se procederá a continuación a tratar sobre los mecanismos que realizan su funcionamiento a través del hidrógeno (H₂) como combustible.

3.23.-Celdas de combustible.

3.23.1.-Introducción.

Hablar de una celda de combustible, significa tratar sobre un dispositivo electroquímico capaz de transformar la energía química almacenada en un combustible, directamente en energía eléctrica y de manera continua.

Los componentes básicos los cuales conforman una celda de combustible, son los electrodos, el cátodo o polo positivo, el ánodo o polo negativo, un electrolito, la sustancia portadora de los iones producidos en las reacciones, la matriz contenedora del electrolito y una placa bipolar, la cual funciona como colector de corriente y distribuidor de gas. (28)

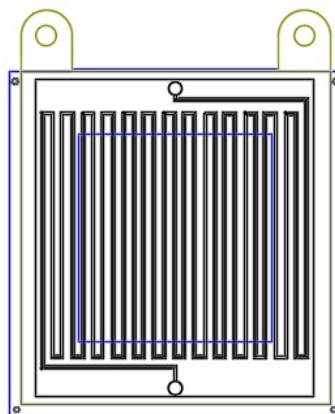


Figura 92: Alzado estructural de una celda de combustible.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

En un primer lugar, se ha de saber cualquier sustancia susceptible de oxidación química que pueda ser suministrada de manera continua a la pila, puede emplearse como combustible. En el mismo modo, aquella sustancia que se reduzca de manera química en un periodo relativamente corto, se puede utilizar como oxidante. El hidrógeno (H₂) y el oxígeno (O₂), son el combustible y el oxidante, más empleados en la actualidad en el ánodo y en el cátodo correspondientemente.

Por un lado, el hidrógeno presenta una alta reactividad en presencia de un adecuado catalizador, pudiendo ser obtenido de diversas fuentes y alcanzando una elevada densidad energética al ser almacenado criogénicamente en ambientes cerrados.

Por otro lado, el oxígeno es obtenido directamente del aire, por lo que su almacenamiento se logra de forma muy sencilla y económica.

Los gases, pasan hacia el electrolito a través de los polos que contienen los electrodos, los oxidantes a través del cátodo y los combustibles a través del ánodo. De esta manera, se genera una interface entre el electrodo, el electrolito y los reactivos, la cual es determinante en el comportamiento electroquímico de la celda. En esta interface, el gas es difundido a través de una región de finas micras de espesor, hasta la superficie del electrodo mojada por el electrolito. En éste lugar, tiene origen la reacción electroquímica, la cual genera las cargas eléctricas y los iones que son transportados a través del electrolito, cerrando de esta manera el circuito.

La cantidad de electrolito presente en la interface, presenta un factor clave, ya que un excesivo contenido de éste dificulta el acceso de los gases a los centros reactivos, donde se encuentra el catalizador. Por el contrario, un bajo contenido de electrolito, limita el transporte de los iones hacia los lugares donde la reacción es producida.

En la siguiente figura se muestra un diagrama de funcionamiento de una celda de hidrógeno (H₂) tipo.

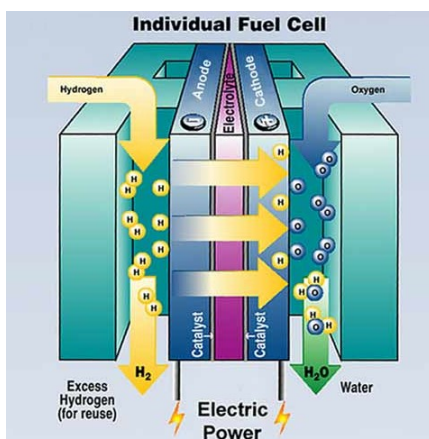


Figura 93: Diagrama de una celda de combustible alimentada mediante hidrógeno (H₂).

Fuente: www.specialnewsonline.wordpress.com

Esta tecnología, es potencialmente más eficiente que cualquier otro sistema, a pesar de que estas celdas presenten eficiencias fluctuantes entre el 35% y el 76%. Se debe señalar que estos equipos ya comienzan a ser empleados en aplicaciones tanto de baja energía como de alta. Las celdas de combustible alimentadas por hidrógeno, consisten en mecanismos muy silenciosos, sin olvidar que generan corriente eléctrica y calor, mientras que como residuo producen única y exclusivamente vapor de agua.

Actualmente, el principal problema presentado en las celdas de combustible, radica en el tiempo de duración de cada celda, junto con el costo de su desarrollo y manufactura. Por esta razón, se deben reducir sus costos de producción y asegurar prolongados periodos de servicio. La aplicación del hidrógeno como vector energético, da lugar a una satisfactoria

respuesta ante los diversos requerimientos energéticos a nivel industrial, siendo actualmente la esperanza más óptima a la hora de sustituir a los motores de combustión interna actuales.

3.23.2.-Clases de celdas de combustible.

Las celdas de combustible, se tratan en realidad de una serie de tecnologías, las cuales emplean diversos electrolitos funcionando a diversas temperaturas. De esta manera, es posible hablar tanto de celdas de combustible de altas temperaturas (>200°C), como de celdas de combustible de bajas temperaturas, las cuales operan hasta los 40°C. Una de las principales diferencias derivadas de la temperatura, consiste en el empleo de diferentes materiales, en especial los electrolitos, ya que a elevadas temperaturas, se no han de emplear electrolitos acuosos.

Explicando las celdas de combustible de elevada temperatura, se tiene como objetivo la generación de energía eléctrica para potencias superiores a 1MW, ya que poseen una alta eficiencia. Por el contrario, las de baja temperatura, se encuentran en desarrollo para generar potencias menores a esa cantidad.

A continuación, se van a explicar las celdas de combustible existentes a día de hoy, con el funcionamiento y las propiedades de cada una de ellas.

3.23.2.1.-Celdas de combustible alcalinas (AFC).

Este tipo de celdas, se caracteriza por el uso de hidróxido de potasio (KOH) concentrado en proporciones de entre el 35% y el 50%, como electrolito. En ciertas ocasiones, cuando las temperaturas de operación han alcanzado los 250°C, puede lograr concentraciones en torno al 85%. Debido a que se trata de un electrolito líquido, es necesario el empleo de una matriz de asbestos, capaz de retenerlo. A su vez, los electrodos poseen altos contenidos en metales nobles, tales como ánodos de platino (Pt) o paladio (Pd), y cátodos de oro (Au) o platino (Pt). Por esta razón, se pueden emplear altos rangos de electrolizadores, bien sea el níquel (Ni), la plata (Ag), óxidos metálicos o incluso espinelas. Este tipo de celdas, ya se encuentra en un estado bastante desarrollado, debido a que han sido empleados en dispositivos de índole espacial.

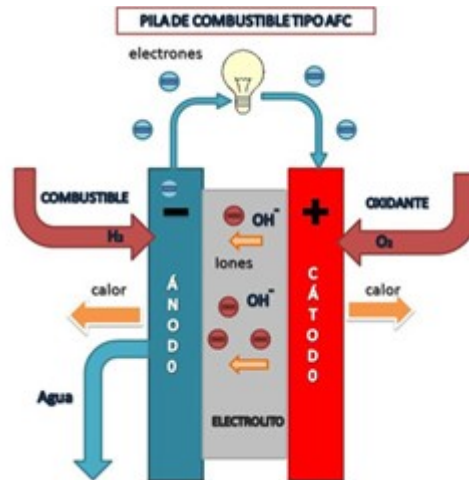


Figura 94: Esquema de una celda de combustible AFC.

Fuente: www.energiasrenovablesinfo.com

Tratando sobre su combustible, ha de emplearse hidrógeno puro, ya que si existen moléculas de CO₂, éstas son absorbidas por el electrolito de hidróxido de potasio, dando lugar a la formación de carbonato potásico. Sin embargo, esta formación, da lugar a una notable reducción en su eficiencia.

Por motivos como el elevado coste en la producción de la pureza del combustible, este tipo de celdas son poco rentables, siendo empleadas básicamente en aplicaciones militares, a pesar de observar un incremento dentro de las instalaciones estacionarias de baja potencia. (8)

3.23.2.1.1.-Reacción que tiene lugar en las celdas AFC.

En estas pilas, se genera una reacción Redox entre el hidrógeno y el oxígeno, en la cual el hidrógeno es oxidado en el ánodo. Esta reacción, genera agua y libera cuatro electrones, los cuales circulan a través de un circuito externo para llegar al cátodo, generando la reducción del oxígeno. Finalmente, se liberan cuatro iones de hidróxido, por lo que la reacción completa consume un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, en la producción de una molécula de agua. Como producto, se genera electricidad y calor. (7)

- $2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$
- $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

3.23.2.1.2.-Electrolitos empleados en las celdas AFC.

La mayoría de estas estructuras, los electrodos se encuentran separados mediante una matriz porosa saturada en una solución acuosa alcalina, principalmente hidróxido de potasio (KOH). Este electrolito, es fácilmente intoxicado con dióxido de carbono, a través de su

conversión a carbonato de potasio (K₂CO₃), por lo que han de emplearse gases purificados y filtros para retener el CO₂. Este proceso es irreversible, sin embargo, ciertos modelos de este tipo de celdas poseen una alta resistencia ante el fenómeno. Estos modelos se dividen en tres categorías:

-*De electrolito líquido estático:* Emplean un electrolito de amianto saturado en hidróxido de potasio (KOH), junto con un catalizador de platino (Pt), para así generar agua pura en el ánodo. A su vez, posee una alta sensibilidad al CO₂.

-*De electrolito líquido circulante:* Se tratan principalmente de las pilas ASK y de las pilas Elo Flux, las cuales se explican a continuación. (7)

1. Pilas ASK: En este modelo de celda, el electrolito que circula entre los electrodos se mezcla con el agua producida, razón por la cual deba ser substituido manualmente cada cierto tiempo. Se caracteriza también por su alta resistencia, fruto de la separación de los electrodos para permitir la circulación del electrolito, lo que provoca al mismo tiempo una disminución en su potencia de salida.
2. Pilas Elo Flux: En este segundo modelo de celda de electrolito líquido circulante, éste circula a través de los electrodos, con la ventaja de ser reemplazado con facilidad, siendo su proceso de fabricación menos costoso.

-*Celda alcalina con membrana de intercambio aniónico:* Dichas celdas, se caracterizan por poseer una serie de membranas semi-impermeables, compuestas de ionómeros. De esta manera, permiten el paso de aniones, pero retienen las partículas de oxígeno e hidrógeno. Para su fabricación se emplean materiales compuestos de metales del grupo de los no nobles, principalmente hierro (Fe), cobalto (Co) y níquel (Ni), para así evitar la formación de carbonatos sobre las superficies de los electrodos.

3.23.2.1.3.-Variantes en las celdas AFC.

Las celdas de boro-hidruro directo y de hidruro metálico, son subclases relativamente recientes dentro de este tipo de pilas de combustible. Principalmente se caracterizan por su alta capacidad para combinar químicamente y almacenar hidrógeno en su interior. (7)

1. *Celdas de boro-hidruro directo:* Esta clase de celdas son alimentadas con boro-hidruro de sodio o potasio como combustible y de aire o peróxido de hidrógeno como oxidante. Ofrecen un alto potencial de trabajo, junto con una producción poco costosa. El combustible, una vez oxidado, puede ser hidrogenado para transformarlo nuevamente en boro-hidruro, mediante agua, electricidad y calor. Tras su reacción, produce hidrógeno, el cual puede ser almacenado para su empleo en otra serie de aplicaciones o procesos.
2. *Celdas de hidruro metálico:* Su funcionamiento se basa en el empleo de hidrógeno puro como combustible y oxígeno como oxidante. Trabajan a temperaturas por debajo de los -20°C, pudiendo ser reversibles, es decir, se pueden recargar de forma eléctrica, dando lugar a una elevada vida útil. Entre sus propiedades más destacables, destacan su buen comportamiento durante el arranque en frío y su capacidad de operación

durante largos periodos sin una fuente externa de hidrógeno, sin la necesidad de desconectar la celda en aplicaciones estacionarias.

3.23.2.2.-Celdas de combustible de metanol directo (DMFC).

Este tipo de celda de combustible, se caracteriza como bien lo nombra su nombre, por el uso de metanol (CH₃OH), bien de forma líquida o gaseosa, como combustible de alimentación. Específicamente, emplea una mezcla de un 3% de metanol en agua como combustible, mientras que emplea el oxígeno del aire como oxidante. Este desarrollo, permite el uso directo de este combustible sin la necesidad de implementar el reformador en el sistema, ya que el metanol produce su oxidación directa en el ánodo, sin modificación alguna por parte del hidrógeno (H₂).

Gran parte de ellos, muestran un funcionamiento similar al que poseen las pilas de polímeros sólidos con membrana de intercambio iónico y electrodos de carbono, junto con una mezcla de platino (Pt) y rutenio (Ru) como catalizador en el cátodo y otra de platino (Pt) en el ánodo. (8)

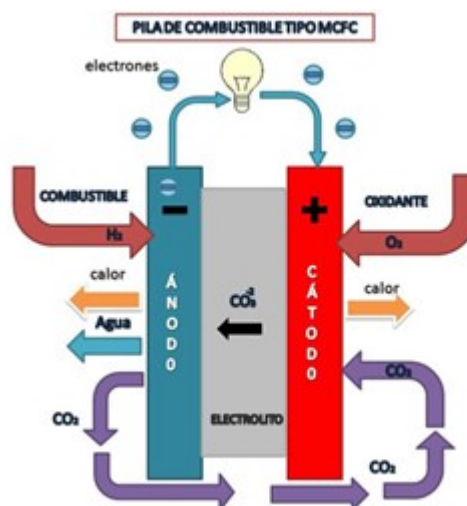


Figura 95: Esquema de una celda de combustible DMFC.

Fuente: www.energiasrenovablesinfo.com

Dichas celdas de combustible, ofrecen rendimientos entre el 20% y el 40%, con temperaturas que rondan los 90° a presión atmosférica, por lo que es utilizada en aplicaciones de pequeños tamaños, ya que su rango de temperaturas es relativamente bajo. Si se incrementa su temperatura de operación, se consigue incrementar su eficiencia, pero sin embargo se genera un aumento en el permeado del combustible, desde el ánodo hasta el cátodo sin producir corriente eléctrica alguna.

Sus principales usos, se encuentran alrededor de energizar equipos militares electrónicos en campo, por lo cual, este campo se encuentra investigando como solventar el problema del permeado. Su desarrollo significaría un considerable avance en las

consideraciones de complejidad, coste y peso, al no llevar incorporado un reformador, por lo que ésta tecnología está aún por perfeccionar.

3.23.2.2.1.-Metanol empleado en las celdas DMFC (CH₃OH).

Se trata de un compuesto, el cual se presenta en estado líquido desde los -97°C hasta los 64,4°C, ante una presión atmosférica. Su densidad energética en volumen, es mayor que la del hidrógeno comprimido y quince veces superior que la de las baterías de litio, mientras que posee una densidad en masa de igual valor a 6,1kWh/kg.

Su transporte es realizado en estado líquido, mediante una serie de depósitos similares a los que poseen los vehículos, con la diferencia de que el peso de todo el sistema es algo superior. Sin embargo, cuenta con una densidad energética en volumen igual a la mitad del que la que cuenta la gasolina.

A la hora de comparar este sistema con el que ofrece un motor de combustión interna de los anteriormente explicados, se observan resultados similares, con la diferencia de que este sistema posee las ventajas que supone un coche eléctrico. (7)

3.23.2.2.2.-Reacción producida en las DMFC.

Principalmente, estas pilas de combustible basan su funcionamiento en la oxidación del metanol en una capa catalizadora, para así formar dióxido de carbono (CO₂), mientras que el agua, es producida en el cátodo y consumida en el ánodo. Los protones (H⁺) deben atravesar la membrana intercambiadora de protones, de tal forma que llegan al cátodo donde sucede la correspondiente reacción con el oxígeno y así producir agua. De esta manera, los electrones se transportan a través de un circuito externo para producir corriente eléctrica de ánodo a cátodo.

• Oxidación en el ánodo	$\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- + \text{CO}_2$
• Reducción en el cátodo	$3/2\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$
• Reacción completa	$\text{CH}_3\text{OH} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

El agua y el metanol, son absorbidos por un catalizador de platino (Pt) y rutenio (Ru), perdiendo agua hasta la formación de dióxido de carbono. Ya que el agua es consumida en el ánodo durante la reacción, el metanol puro no puede utilizarse sin proveer agua a la celda, por lo que su densidad queda limitada, complicando de esta forma el diseño de los sistemas de aprovisionamiento de agua.

Actualmente, se emplea un catalizador de platino tanto en la oxidación como en la reducción, afectando negativamente al rendimiento de la celda. Esto es debido a que el metanol presente en la zona del cátodo se oxida. Si se fija otro catalizador para la oxidación, este problema queda solucionado y además se reduce significativamente su coste.

Otro problema que presenta el catalizador de platino, se debe a la adherencia del monóxido de carbono generado tras la oxidación del metanol, reduciendo significativamente

su efectividad. Por esta razón, es por la que se añade rutenio, ya que así se provoca la oxidación del agua, dando lugar al OH, que a su vez oxida el CO y el CO₂ liberado. (7)

3.23.2.3.-Celdas de combustible de etanol directo (DEFC).

Se trata de una clase de celdas de combustible de propiedades similares a las que emplean metanol, con la diferencia de que ofrecen una serie de ventajas al emplear etanol (C₂H₅OH) como fuente del combustible. Principalmente, se ha de conocer que su grado de toxicidad no es tan elevado como en el caso anterior, por lo que perjudica de menor forma a la celda, ofreciendo una amplia gama de facilidades a los consumidores. Para su empleo, ya existe en el mercado actual, una cadena de suministro, debido a sus expandidas aplicaciones, incluso es utilizado en algunos motores de explosión. (8)

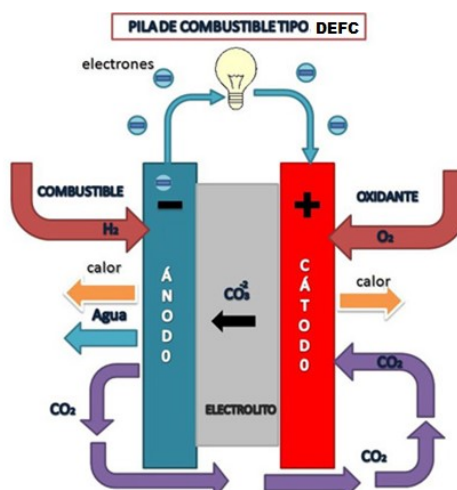


Figura 96: Esquema de una pila de combustible DEFC.

Fuente: www.energiasrenovablesinfo.com

Hoy en día, se han desarrollado nuevos catalizadores nano-estructurados para este tipo de celdas, los cuales emplean metales del grupo de los no nobles, esencialmente hierro (Fe), cobalto (Co) y níquel (Ni), mezclados en el ánodo y puros en el cátodo. De esta forma, se ha logrado incrementar su rendimiento y reducir su coste.

Como electrolito, se emplea un polímero. Por consiguiente, el etanol líquido (C₂H₅OH) es oxidado en el ánodo, gracias a la presencia de agua, por lo que se da lugar a dióxido de carbono (CO₂), a cationes de hidrógeno (H⁺) y a electrones (e⁻). Estos electrones, viajan a través de un circuito externo, mientras que los protones cruzan la membrana, para dar lugar junto con el oxígeno y los electrones a una determinada cantidad de agua en el otro extremo del dispositivo.

3.23.2.3.1.-Etanol empleado en las celdas DEFC (C₂H₅OH).

El etanol, el cual posee una densidad energética de 8kWh/kg, puede ser obtenido en grandes cantidades de la biomasa mediante una serie de procesos de fermentación, empleando recursos renovables como pueden ser la caña de azúcar, el trigo, el maíz o la paja.

Otro de los atractivos que presenta el bio-etanol, es su elevado potencial de absorción de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, de tal forma que aunque las celdas liberen este gas, esto da lugar a un ciclo cerrado. Otra de las principales ventajas, es su transporte y almacenamiento, que al igual que en los combustibles convencionales, puede emplear depósitos similares. (7)

3.23.2.4.-Celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC).

Este tipo de celdas de combustible, basan su empleo en el uso de ácido fosfórico como electrolito (H₃PO₄), el cual se encuentra en el interior de una matriz de carburo de silicio (SiC) a temperaturas de entre los 150 y 250°C de operatividad. El ácido fosfórico, se solidifica a los 40°C, lo que dificulta su puesta en marcha, limitando su funcionamiento continuo. A su vez, emplea platino (Pt) soportado sobre láminas de carbón, como material componente de sus electrodos, por lo que poseen una alta sensibilidad a ser envenenados mediante monóxido de carbono.

Este tipo de celdas, son muy tolerantes a las impurezas, ofreciendo elevadas eficiencias de alrededor del 85%, cuando el vapor generado es empleado para cogeneración. Si este producto no es empleado en cogeneración, se observa un importante descenso en su eficiencia, hasta alcanzar valores del 37%, a pesar de que siguen siendo porcentajes importantes. (7)

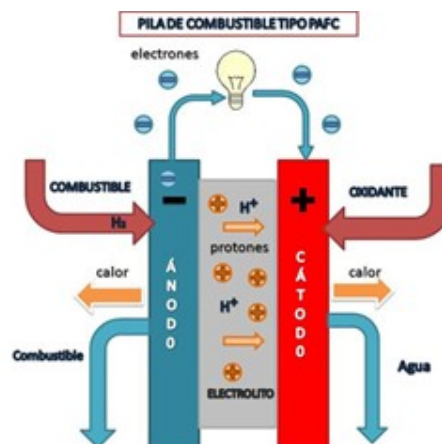


Figura 97: Esquema de una celda de combustible PAFC.

Fuente: www.energiasrenovablesinfo.com

De acuerdo a su implementación, se ha de resaltar, que su implementación tiene lugar a corto plazo. Esto es debido a su alta tolerancia a los diferentes contaminantes generados en los procesos de reformado de los hidrocarburos, siendo dichas tolerancias muy superiores a las del resto de celdas de combustible existentes.

A la hora de tratar sobre sus aplicaciones, junto con las celdas de combustible alcalinas, este grupo de pilas posee uno de los mayores rangos de aplicación, debido a que poseen un alto desarrollo tecnológico, aplicado en gran cantidad de aplicaciones estacionarias. Entre algunas de las aplicaciones más corrientes, se encuentra su implementación en diferentes clínicas, hospitales, hoteles entre otros edificios de elevado personal, sin olvidar su empleo en ciertos vehículos, en los cuales ya se han llevado a cabo ciertos proyectos demostrativos.

Por el contrario, a pesar de su alto número de aplicaciones, el uso de ácido fosfórico como electrolito, presenta una elevada corrosión y un complicado manejo debido a su peligrosidad, lo que genera que su uso tienda a restar frente a otros modelos de celdas.

3.23.2.5.-Celdas de combustible de Carbonatos fundidos (MCFC).

Dentro de este cuarto tipo de celdas de combustible, se ha de destacar el uso de una sal fundida de carbonatos alcalinos, principalmente litio (Li), sodio (Na) y potasio (K), retenidos en una matriz de aluminato de litio, como electrolito. Estos compuestos, han de operar a temperaturas superiores a los 600°C, ofreciendo elevados rendimientos del 60%, los cuales pueden lograr el 85%, si su calor residual es correctamente recuperado y aprovechado.

En el momento de construir los electrodos, se emplea níquel (Ni) dopado de cromo (Cr) o aluminio (Al) en el ánodo, mientras que óxido de níquel (Ni) litiado en el cátodo, encontrándose en desarrollo otros materiales compatibles, los cuales ofrezcan una mayor resistencia a la corrosión. (8)

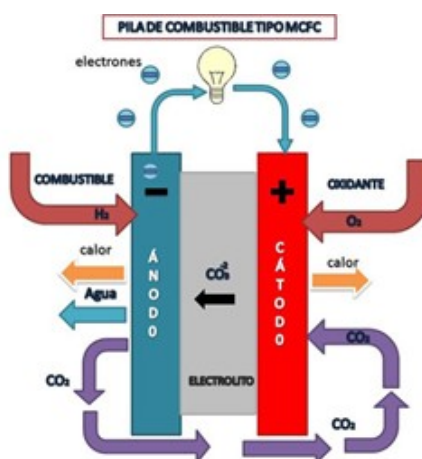


Figura 98: Esquema de una celda de combustible MCFC.

Fuente: www.energiasrenovablesinfo.com

Entre una de sus principales ventajas, se encuentra su capacidad de admisión de elevadas concentraciones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) en sus gases de alimentación. Esta característica, las hace óptimas al empleo de cualquier tipo de combustibles, tales como gas natural, biogás o bioetanol, entre otros. Los óxidos de carbono, son generados durante el proceso de reformado de estos combustibles, por lo que no es necesaria su eliminación, como en el caso de otros tipos de celdas. Debido a esta propiedad, ya que ninguno de los dos gases anteriormente nombrados afectan a sus componentes, se creen que también pueden funcionar con óxidos de carbono empleados como combustibles e incluso usarse en el reformado del carbón en hidrógeno. A su vez, presentan una elevada resistencia al sulfuro y a otros elementos que intervienen en el proceso.

Además, al contrario que en otros tipos de celdas de combustible que operan a temperaturas inferiores, las de carbonato fundido no requieren de un reformador externo que transforme determinados combustibles en hidrógeno, ya que su elevada temperatura los transforma directamente mediante un proceso denominado reformado interno. Mediante este mecanismo, los costes también son reducidos.

Hasta la actualidad, esta clase de pilas han sido operadas con hidrógeno, monóxido de carbono, gas natural, propano, gas de relleno sanitario, diesel marino y otros productos simulados tras la gasificación del carbón, mediante el empleo de celdas desde 10kW hasta 2MW. Sus elevadas temperaturas durante su operación, poseen una elevada ventaja, ya que ello da lugar a unas mayores eficiencias y flexibilidades en el uso de diferentes combustibles, mediante el empleo de catalizadores de menor coste. Esto se debe a que las reacciones de rotura en los enlaces de carbono presentes en las cadenas de hidrocarburos, ocurren a mayor velocidad a medida que la temperatura se va incrementando. Sin embargo, este aumento de temperaturas puede dar lugar a procesos corrosivos y fallos en el sistema.

Generalmente, su empleo tiene lugar en aplicaciones estacionarias, como por ejemplo, industrias, plantas energéticas o aplicaciones de índole militar.

3.23.2.6.-Celdas de combustible de óxidos sólidos (SOFC).

Se trata de otro tipo de celda de combustible altamente prometedoras, debido a su alta capacidad de operación ante costos competitivos y a su bajo coste de producción, las cuales podrían en un futuro ser empleadas de aplicaciones de potencia, tales como en estaciones generadores de energía eléctrica a gran escala, o en industria. (7)

Basa su funcionamiento en el empleo de electrolitos en estado sólido, por lo que no presenta problemas de corrosión, dando lugar a un amplio rango de ventajas frente a otros tipos de celdas de combustible. Ya que se trata de un sistema de óxido sólido, se utiliza un material sólido cerámico, principalmente zirconio (Zr), permitiendo alcanzar temperaturas de operación cercanas a los 1000°C.

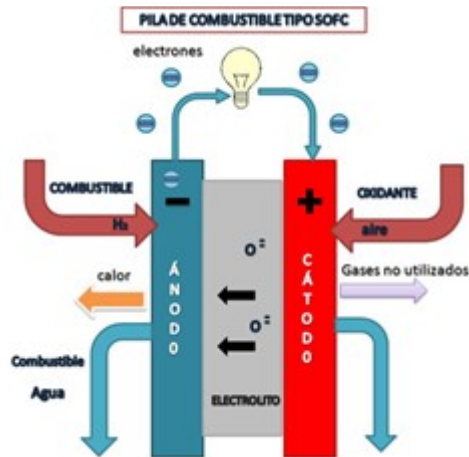


Figura 99: Esquema de una celda de combustible SOFC.

Fuente: www.energiasrenovablesinfo.com

Al igual que el anterior tipo de pilas de combustible, el hidrocarburo alimentado puede ser reformado en el interior de la celda. Para ello, emplean un sistema de tubos de longitud igual a un metro, cuya disposición permite el alcance de grandes eficiencias, mientras que en otras variaciones se presenta un disco comprimido, ofreciendo a su vez, importantes ventajas en su fabricación y eficiencia. Dicha morfología, nace a la hora de vaciar el material sólido en diferentes estructuras durante su fabricación, por ejemplo de forma plana, tubular o monolítica. Al igual que en otros tipos de celdas, si el calor residual es utilizado para cogeneración, su eficiencia puede superar el 80%. (8)

Actualmente, se encuentra unidades de 25kW y otra de 100kW en estado de prueba.

3.23.2.7.-Celdas de combustible poliméricas (PEMFC).

Este tipo de pilas de combustible, ha sido el responsable del gran impulso de estas nuevas tecnologías a lo largo de estos últimos años, tanto a la hora de considerar su producción energética como sus aplicaciones automovilísticas. El desarrollo de este nuevo tipo de celdas, aparece tras el empleo de un polímero denominado Nafion, como electrolito. Esta clase de electrolito, consiste en una membrana compuesta por este polímero, la cual se encuentra unida a grupos funcionales, capaces de intercambiar aniones y cationes. (29)

A pesar, de no ser notablemente más eficientes que los otros tipos de pilas de combustible estudiadas hasta el momento, poseen una ventaja fundamental, por la cual se encuentran en cabeza. Su operatividad a temperaturas no muy elevadas, rondando alrededor de los 90°C. Esta temperatura de funcionamiento, permite a este tipo de celdas realizar arranques en cortos periodos de tiempo, junto con un alto grado de respuesta frente a los cambios demandados de potencia.

También, se ha de comentar su alto valor de densidad de potencia, lo cual les proporciona una importante eficacia durante la automoción, donde su volumen y su peso, les convierte en una tecnología ideal, sin ser afectados por el dióxido de carbono (CO₂).

Otras dos características importantes a tener en cuenta dentro de este tipo de celdas, son la eliminación de productos corrosivos, debido al uso único y exclusivo de agua (H₂O) y su baja susceptibilidad a la orientación de la pila. (7)



Figura 100: Celda de combustible PEMFC.

Fuente: www.lacerca.com

Esta tecnología, permite su fabricación, con una estructura de alto grado de compactación, tal como el grosor de una hoja de papel, de tal forma que dé lugar a una generación de varios miliamperios de corriente por cada centímetro cuadrado.

Los prototipos más novedosos dentro de este grupo de pilas de hidrógeno, evitan la presurización del combustible a la hora de incrementar su eficiencia, siendo controlado el manejo de agua (H₂O) en el sistema, para así evitar posibles derrames e inundaciones en los electrodos. De esta forma, se mantiene a su vez la humedad necesaria en el interior de la membrana, para que ésta permita la conducción iónica de las cargas positivas que provienen del ánodo.

Producto residual dentro de este tipo de celdas, se obtiene una importante cantidad de calor útil, el cual no puede a día de hoy ser utilizado en cogeneración, pero puede ser aprovechado en sistema calefactorios del propio vehículo, o de agua caliente.

Prácticamente el 95% de los prototipos de automóviles que emplean ésta tecnologías, basan su funcionamiento en este tipo de pilas de combustible, sin olvidar su investigación dentro del campo en aplicaciones de obtención energética estacionaria, ya que se tratan de las más adecuadas a la hora de penetrar masivamente en el mercado. De esta manera, se prevén unas mayores expectativas en las próximas décadas, debido a que han sido probadas con un menor rango que los otros tipos de celdas y su eficacia es relativamente baja todavía, a pesar de que ya poseen importantes aplicaciones.

Gran parte del éxito mostrado por este tipo de celdas, se debe a los avances tecnológicos en sus materiales con propiedades fisicoquímicas más favorables. A su vez, son muchas las empresas privadas y organismos públicos de investigación de índole nacional, los cuales se encuentran investigando y desarrollando, dentro del campo de investigación, sobre este tipo de pilas y demás actividades relacionadas con la tecnología del hidrógeno. El desempeño de este tipo de celdas poliméricas es de diversa variación, ya que depende de parámetros como su presión, temperatura o calidad de sus gases.

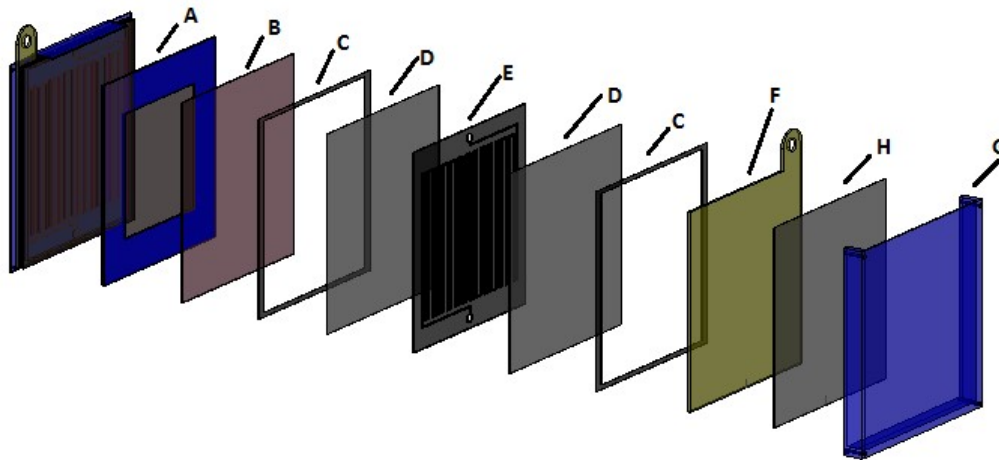
Otra área dentro de esta clase de celdas, en la cual se espera una mejora adicional, se trata de su sección de materiales, principalmente en el electro-catalizador. Actualmente, se está investigando tanto en el empleo de nuevos materiales, los cuales posean un coste menor, como en un diseño más óptimo de electrodos con una configuración de poros, para disminuir la carga del electro-catalizador.

Dentro de los electrodos de corriente y en las placas de la celda, se está investigando en universidades e instituciones científicas, ya que juegan un papel importante como distribuidores de gases.

Como se ha mencionado anteriormente, este tipo de celdas de combustible son las más empleadas actualmente en el campo del automóvil debido a sus amplias prestaciones frente a las otras clases. Por lo tanto, para el objeto del presente estudio, se ha de profundizar en la presente clase de pilas de combustible, comentando por estudiar y analizar cada uno de sus componentes con sus respectivas propiedades.

3.23.2.7.1.-Elementos que componen una celda de combustible polimérica (PEMFC).

En un primer lugar, se ha de conocer que una pila de combustible polimérica, se encuentra compuesta por numerosos elementos, los cuales han de hallarse optimizados y diseñados de acuerdo a su desarrollo favorable, ante los fenómenos químicos y físicos que se encuentren presentes. Especialmente, dentro de este tipo de celdas, se van a analizar los electrodos, el electrolito, el MEA, las placas difusoras y las placas bipolares. (28) En la siguiente figura, se muestra un desarrollo de los componentes los cuales van a ser estudiados a continuación.



A.	Membrana de los electrodos y el electrolito (MEA).
B.	Capa difusora.
C.	Juntas de soporte de las placas bipolares.
D.	Capa metálica protectora de las placas bipolares.
E.	Placa bipolar.
F.	Placa colectora.
G.	Base protectora de la celda de combustible.
H.	Placa soporte entre la base protectora y las placas colectora.

Figura 101: Componentes de una celda de combustible tipo PEMFC.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

3.23.2.7.1.1.-Electrodos.

En un primer lugar, se describen de forma genérica a los electrodos, como una serie de capas catalíticas de fino espesor, situadas entre las capas difusoras y las membranas. Estas capas se encuentran dispuestas tanto en el ánodo como en el cátodo. (7)

En las celdas de combustible poliméricas, se emplean electrodos de alta porosidad, los cuales funcionan como difusores de gases. A pesar de la existencia de varios electrodos compuestos por distintos materiales, los de mayor empleo se encuentran formados por una fina capa, mezcla de platino (Pt) y polvo de carbón, sobre una delgada tela de carbono (C) poroso impermeabilizado, junto con un material denominado PTFE. Éste último compuesto, actúa tanto como soporte y como difusor, de los gases que se dirigen hacia el electrodo de platino (Pt). A su vez, mediante el uso de estos materiales, se logra una mayor densidad de corriente en relación con la entalpía del hidrógeno absorbido, la cual es la manera más habitual de realizar la medición de la actividad catalítica en los electrocatalizadores.

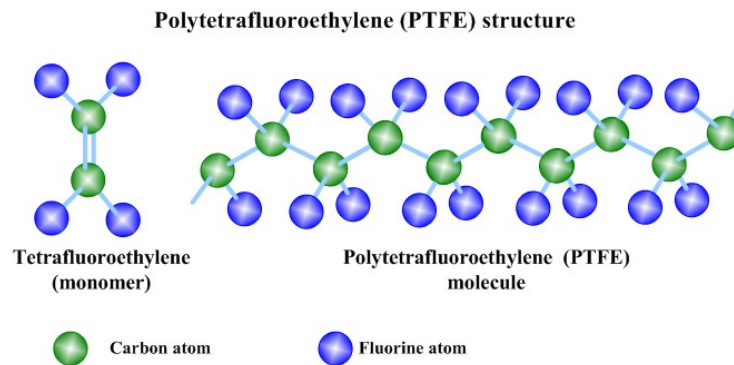


Figura 102: Estructura de una molécula de PTFE.

Fuente: www.substech.com

En estos elementos, se forma la interface en la cual entran en contacto el gas a reaccionar, el propio electrodo y el electrolito. En un primer lugar, en una fracción de los poros, se alcanza en equilibrio entre la fuerza capilar y la presión del gas, donde a continuación se da lugar a la reacción con la que se genera una intensidad de corriente a un determinado potencial.

Por lo tanto, en un electrodo poroso, solo contribuyen en la generación de energía eléctrica, aquellos poros en los cuales su presión capilar se equilibra con la presión de la sustancia gaseosa. Los poros que son demasiado estrechos, se inundan totalmente de electrolito, debido al efecto de la presión capilar, por lo que en ellos no puede tener lugar dicha reacción. Por el contrario, en los poros que presentan un ancho tamaño, el gas puede circular libremente sin llegar a reaccionar.

A la hora de lograr una completa transformación sobre el gas, los electrodos porosos son contruidos de una doble capa. Por un lado se encuentra la capa cubierta, denominada de poros finos y dispuestos sobre la cara del electrolito, mientras que por otro lado se tiene la capa activa. Esta segunda capa, posee gruesos poros, por lo cual se dispone sobre el lado de contacto con el gas.

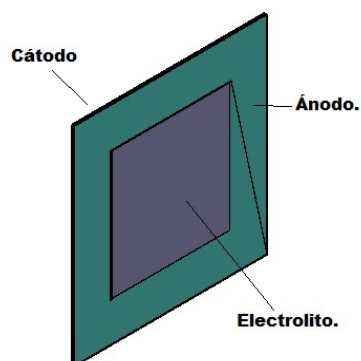


Figura 103: Electrodos de una celda de combustible polimérica.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Para lograr una potencia suministrada más óptima, es necesaria una correcta dispersión del electro-catalizador sobre la superficie del electrodo. Esto es logrado mediante el uso de polvo de carbón finamente dividido, sobre el cual el electro-catalizador es distribuido. El polvo de carbón más rentable para esta aplicación, es el Vulcan.

En los primeros modelos de este tipo de celdas, se han empleado cantidades de platino (Pt) alrededor de 4 mg/cm, cantidad que en la actualidad ha sido reducida por debajo de los 0,5 mg/cm. Dada la baja temperatura de trabajo, el catalizador es muy sensible ante el monóxido de carbono (CO), ya que determinadas trazas de este gas, pueden envenenar al catalizador.

Esto es debido a que por debajo de los 150°C el monóxido se enlaza fuertemente al platino (Pt), ocupando lugares a los que no puede acceder el hidrógeno. Una línea de mejora de la actual tecnología se dirige hacia el desarrollo de membranas que puedan trabajar por encima de los 150 °C, de modo que las pilas puedan emplear hidrógeno de menor pureza, incluso proveniente del reformado sobre el gas natural.

En una etapa inicial de desarrollo de las pilas poliméricas, los avances relacionados con los materiales en los electrodos se limitaron al desarrollo de electro-catalizadores de platino (Pt) nano-particulados, para así incrementar la superficie activa de dicho catalizador. De esta forma, la actividad se mantenía reduciendo la cantidad de platino (Pt) empleado.

Posteriormente, se han ensayado con numerosos catalizadores alternativos, desde metales o aleaciones, tales como las ya clásicas de platino con rutenio (Pt/Ru), hasta óxidos, e incluso polímeros conductores y materiales híbridos. El principal reto se centra en la sustitución del platino (Pt) en el electrodo positivo, donde tiene lugar la reducción del oxígeno, ya que éste, se trata un proceso que involucra cuatro electrones y por tanto, es cinéticamente complejo y delicado.

La reducción parcial de oxígeno para dar por ejemplo radicales peróxido o superóxido, sería muy perjudicial para el funcionamiento a largo plazo de las celdas y por tanto no cualquier electrocatalizador es viable como alternativa al platino (Pt). A pesar de que el mencionado platino (Pt) es peor catalizador en la reducción del oxígeno que en la oxidación del hidrógeno, se trata de uno de los materiales de mayor viabilidad para ésta función. (8)

3.23.2.7.1.2.-Placas difusoras.

Las capas o placas difusoras de gas, se tratan de una serie de láminas de material poroso, cuyo objetivo consiste en distribuir el combustible de la manera más homogénea posible sobre la superficie de consumo. De esta forma, se logra un mayor contacto entre el combustible y la superficie de consumo.

Estas capas que sirven de soporte mecánico para los electrodos, se encuentran compuestas de materiales porosos, los cuales son buenos conductores de la electricidad, de forma que distribuyen los gases de manera uniforme sobre las capas catalíticas. A su vez, también cumplen la función de favorecer la extracción del agua líquida en la capa catalítica del cátodo, sirviendo de conexión eléctrica entre las capas catalíticas y las placas bipolares. (28)

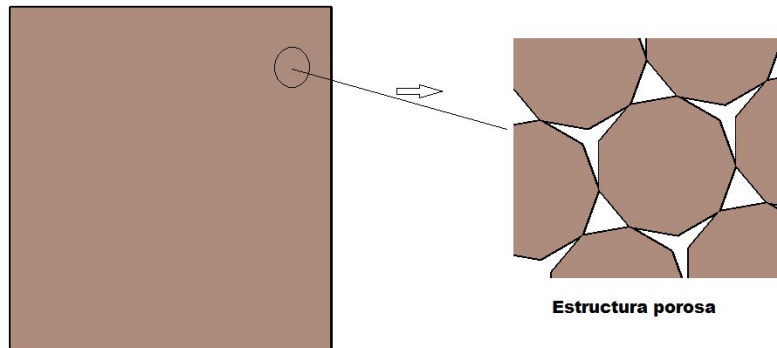


Figura 104: Placa difusora en una celda de combustible polimérica.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Los materiales empleados para su fabricación, se encuentran caracterizados por una serie determinada parámetros, tales como su compresibilidad, su permeabilidad, su conducción térmica y su conducción eléctrica. Generalmente se utilizan láminas carbono (C), ya que proporcionan un soporte mecánico necesario sobre la membrana y sobre la capa catalítica. Para evitar la acumulación de agua en su interior y su consiguiente bloqueo en la circulación de gases, se le incorpora un material hidrófobo, el cual se trata del teflón (PTFE). (8)

3.23.2.7.1.3.-Placas bipolares.

Consisten en una serie de placas, cuyas funciones principales son la de permitir la distribución de los gases reactantes, su recolección, la distribución de la corriente generada y el manejo del calor generado. Para el logro de sus objetivos, el material que lo componga, debe proporcionar una elevada conductividad eléctrica, una alta compatibilidad química con el resto de componentes de la celda, ser poco corrosivo, fácil de maquinar, poco volumétrico, rígido y de bajo coste. (7) Uno de los materiales empleados, el cual proporciona altas prestaciones frente a los parámetros anteriores, es el grafito.

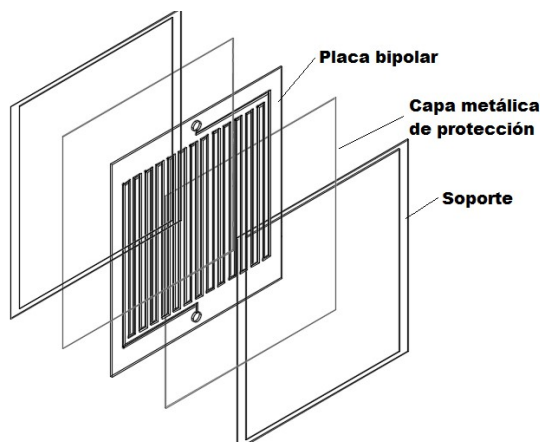


Figura 105: Componentes de una placa bipolar de grafito en una celda de combustible polimérica.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Estos elementos, se encuentran compuestos por una serie de canales, los cuales permiten el transporte de los gases reactantes hacia el área activa, que se encuentra ubicada en el centro de las placas. Dicho área, está formada por un conjunto de canales que comunican a su vez con otros conductos encargados de drenar el agua generada.

Otro aspecto a tener en cuenta dentro de las placas bipolares, es la distribución que poseen los reactantes. Esto se debe a que cuanto mayor sea la superficie de contacto entre los gases y el sistema de membrana y electrodo, mayor será la corriente generada. Por lo tanto, se requiere de un diseño adecuado de los canales de flujo, el cual difiere dependiendo del fabricante de la celda. (28)

El diseño en la trayectoria de los gases, depende fundamentalmente del ancho y de la profundidad del canal, el cual busca un equilibrio entre la caída de concentración de los reactantes a lo largo del canal y el contacto con la superficie de la membrana. A la hora de diseñar un stack o conjunto de celdas, ha de considerarse la interconexión entre las placas. Entre los diseños existentes, se pueden encontrar los de serpentón, espiral, romboide y canales cruzados, los cuales poseen una mayor eficiencia frente al resto de configuraciones.

3.23.2.7.1.4.-Colectores de corriente.

Los colectores de corriente con altas prestaciones técnicas, son los encargados de cerrar el circuito eléctrico de la celda de combustible, permitiendo de este modo la conexión con la aplicación externa, la cual demande la corriente eléctrica generada. Se encuentran fabricadas de una matriz porosa de un material que sea buen conductor de la electricidad, bien el cobre (Cu) u otro metal recubierto de una fina capa de oro (Au), con la finalidad de incrementar la conducción. El interior de esta matriz, debe contener también una determinada cantidad de carbono, debido a que es una sustancia inerte y se encuentra ligada a la base del material polimérico. (8)

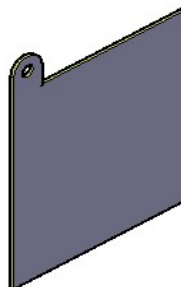


Figura 106: Placa colectora de cobre (Cu), cubierta de una aleación entre níquel (Ni) y oro (Au).

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Su porosidad, contempla la función de permitir el flujo de los fluidos a través suyo, ya que se sitúan adheridos a la capa catalítica de la membrana y así permiten recoger tanto la corriente eléctrica generada, como el agua (H₂O). Para la recogida de esta segunda sustancia, es necesaria además, la colocación de un material hidrofóbico entre la membrana y el colector de corriente.

Estos elementos, se encuentran separados de las placas terminales, es decir, son independientes, incluso a la hora de tratarse de mono-celdas. (7)

3.23.2.7.1.5.-Placas terminales.

Este elemento dentro de una celda de combustible, posee la funcionalidad de la protección y el cierre hermético de la celda, por lo que debe de estar diseñado de tal manera que proporcione un apriete homogéneo de todos sus componentes interiores.

Por el contrario, si se tiene un cierre ineficiente frente a los diferentes componentes, pueden aparecer ciertas fugas al exterior por parte de los gases reactantes, lo cual genera una serie de peligros. Al igual que se producen fugas, también se incrementarían las resistencias de contacto, dando lugar a un decremento en la eficiencia global de la pila de combustible. Las placas terminales, deben llevar incorporados las conexiones a los conductos de entrada y salida para los reactivos y los productos respectivamente. (9)

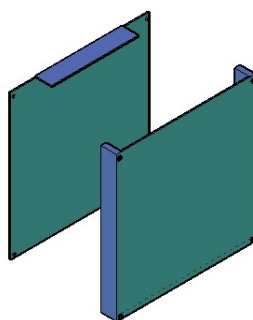


Figura 107: Placas terminales.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Si por el contrario se decide colocar colectores de corriente como elementos individuales, las placas terminales quedan exentas de las funciones de éstos, por lo que pueden ser fabricadas con materiales no conductores, tales como polímeros termoplásticos o cerámicos.

3.23.2.7.1.6.-Sellos y juntas.

Tanto los sellos como las juntas, forman parte del sistema de encapsulado y cerrado de las pilas de combustible. Junto con las placas terminales, son los encargados de evitar las fugas de los gases hacia el exterior y el cruce de gases entra las diferentes caras de la celda, pudiendo encontrarse como elementos individuales o estar integrados dentro del propio electrodo. (9)

A la hora de su fabricación, se emplean polímeros termoplásticos capaces de soportar las condiciones de operación de la pila de combustible, tales como el teflón (PTFE), el caucho compuesto por etileno, propileno y dieno (EPDM), el fluoruro de vinildieno (VDF) o las siliconas.

3.23.2.7.1.7.-El electrolito.

Se trata fundamentalmente del elemento que más caracteriza a esta clase de celdas de combustible, debido a su naturaleza polimérica.

Consiste en una membrana polimérica en estado sólido, formada por un ionómero perfluorosulfonado. Entre este tipo de celdas de combustible que trabajan a bajas temperaturas, el electrolito comercial más empleado en automovilismo a día de hoy es el Nafion. La membrana compuesta por este elemento, se caracteriza por contener un esqueleto perfluorosulfonado, dentro de la clase de los politetrafluoroetileno, con cadenas laterales terminadas en sulfonatos. (29)

Principalmente, este tipo de membranas se caracteriza por tener un elevado grado de conducción protónica a través de ésta, ser impermeables frente a los gases y proporcionar un aislamiento interno. Por el contrario, ya que no existe un comportamiento ideal en las diferentes tecnologías, dichas características no se cumplen en su totalidad, siendo una de las principales causas en la caída de tensión de una pila de combustible. (28)

Para que esta membrana sea buena conductora de protones, deberá encontrarse fuertemente hidratada y además, los gases de entrada deben de estar humidificados para así evitar la deshidratación por parte de la membrana. Sin embargo, a su vez se ha de evitar la inundación de los electrodos, por lo que la gestión de la humedad es clave en las en este tipo de pilas.

Por el contrario, su conductividad de protones no aumenta de manera significativa con la temperatura, ya que el presente polímero es incapaz de retener agua (H₂O) con temperaturas superiores a los 80°C, limitando su funcionamiento a elevadas temperaturas.

A continuación, dentro de este apartado, se va a estudiar de un modo más extenso en qué consiste el Nafion, junto con sus propiedades, las cuales le han convertido en el electrolito de mayor empleo dentro de las celdas de combustible poliméricas.

3.23.2.7.1.7.1.-El Nafion como principal componente de las celdas de combustible poliméricas.

El Nafion, es caracterizado por contener un esqueleto perfluorosulfonado, encontrándose dentro de la clase de los politetrafluoroetileno, al poseer cadenas laterales terminadas en sulfonatos. Consiste en el primero de una serie de polímeros sintéticos, los cuales poseen propiedades iónicas, denominados ionómeros. Debido a la incorporación de ciertos grupos de éter de vinilo perfluorados, que terminan en grupos de sulfonato en el interior de un esqueleto de tetrafluoroetileno, hacen del Nafion un material con propiedades iónicas únicas.

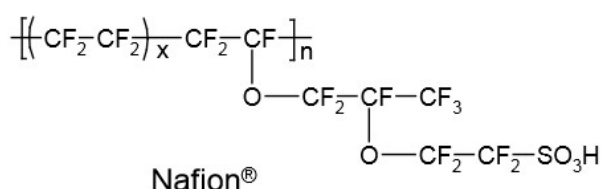


Figura 108: Estructura polimérica del Nafion.

Fuente: www.sigmaaldrich.com

Este material, se trata de la membrana más extensamente estudiada y empleada en el desarrollo de las pilas de combustible poliméricas, ya que posee una alta conductividad de protones, una importante resistencia mecánica, una excelente estabilidad, junto con una asequibilidad comercial.

Sus inicios, se encuentran a finales de los años sesenta, fecha en la cual la compañía Dupont, desarrolla la primera membrana comercial, el Nafion-120. En sus empleos se han abarcado ciertos procesos cloro-álcalis, la electrólisis, en sensores y en pilas de combustible.

Posteriormente, en competencia con otros tipos de materiales, se han fabricando diferentes modelos de membranas de Nafion, en las cuales se ha disminuido su peso equivalente y su grosor, mientras que se han optimizado varias de sus propiedades. A continuación, se muestra una tabla con una serie clases de membrana de Nafion, las cuales han sido las más empleadas comercialmente, indicando su peso equivalente frente a su grosor.

Tabla 8: Clases de membranas de Nafion.

Tipo de membrana.	Peso equivalente.	Grosor en mm.
Nafion-120	1200	250
Nafion-117	1100	175

Nafion-115	1100	125
Nafion-112	1100	50
Nafion-111	1100	25
Nafion-105	1000	125

Su elevada conductividad, se debe a su micro-estructura interna. Hasta la actualidad, se ha postulado la existencia de una serie de agregados iónicos, los cuales se encuentran formados por iones de sulfonato y por el agua absorbida a través de la membrana. Esta absorción se genera debido a los poros de entre 3 y 5nm de diámetro, que se encuentran conectados mediante estrechos canales de 1nm. De esta forma, cuando la membrana se deshidrata, tanto el tamaño de estos agregados como el de los canales que los unen, disminuye. Esto genera un decrecimiento en la movilidad de los protones y en consecuencia, su conductividad decrece.

Otro modelo propuesto, expone la existencia de tres fases, en las cuales estos agregados iónicos y las regiones cristalinas coexisten con una tercera zona amorfa, hidrófoba y con un menor contenido de agua y en grupos iónicos.

Para producir un aumento sobre la conductividad de las membranas sulfonadas a temperaturas más altas, se han propuesto dos vías, basadas en el empleo de Nafion. La primera estrategia, consiste en la introducción de sustancias hidrófilas que ayuden a mantener la membrana hidratada a temperaturas más elevadas. Por ejemplo, se ha estudiado la introducción de cationes de cesio (Cs) heteropoliácidos, el uso de óxido de silicio (SiO₂) o el del ZrHPO₄, entre la membrana de Nafion. Todos estos materiales híbridos orgánicos e inorgánicos se basan en la búsqueda de una sinergia entre los dos componentes, lo cual se ha empleado en muy diversas áreas.

Una segunda estrategia, consiste en sustituir el agua por otra sustancia, por ejemplo un disolvente no acuoso, con un punto de ebullición mayor que el del agua. De esta manera, ésta acepta en una mayor medida a los protones en el interior de la membrana perfluorosulfonada. Entre diferentes componentes estudiados, destacan el ácido fosfórico (H₃PO₄) o el BMITF, en combinación con el Nafion.

A lo largo del tiempo, con el desarrollo de este tipo de pilas de combustible, numerosas organizaciones científicas, han estado analizando y buscando nuevos materiales, los cuales sean capaces de sustituir al Nafion, de tal forma que cumplan y a su vez, optimicen las propiedades de éste. Entre los numerosos estudios de posibles elementos, científicos creen haber descubierto una nueva clase de membrana capaz de aportar numerables ventajas dentro de dicha aplicación, el quitosán.

3.23.2.7.1.7.2.-Membrana de quitosán para celdas de combustible poliméricas.

Con la finalidad de generar una energía limpia y combatir de esta manera el cambio climático, se encuentra en desarrollo un nuevo modelo de membrana compuestas por membranas de quitosán. Este material, se trata de un polímero biodegradable obtenido a

partir del tejido de ciertos crustáceos, hongos e incluso algunos insectos como los blatodeos, mejor conocidos como cucarachas.

Se trata de un tipo de membrana compuesta por la combinación de dos materias. En un primer lugar, se encuentra, como bien indica su nombre, el quitosán, mientras que a éste se le añade una cantidad determinada de sílice, ya que se trata de una sustancia base en los vidrios, la cual se degrada y se integra al suelo sin generar contaminación alguna. De esta manera, se obtiene una membrana económica y a su vez biodegradable, capaz de sustituir al Nafion.

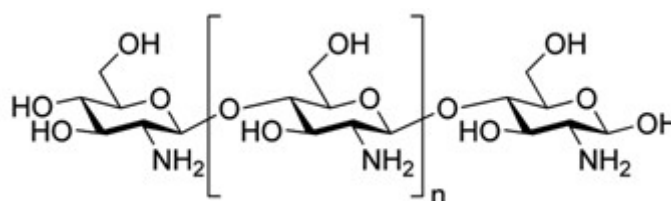


Figura 109: Estructura polimérica del quitosán.

Fuente: www.biopol.free.fr

El impacto ambiental generado tras su desecho, es mínimo, a diferencia de los materiales empleados actualmente, los cuales generan un rastro desde su fabricación hasta su desecho.

Como idea principal, como se comentó anteriormente, se tiene la sustitución del Nafion empleado actualmente en las celdas de combustible poliméricas, por lo que se requiere de una modificación sobre el polímero de quitosán a partir de un proceso denominado Sol Gel. En este procedimiento, se disuelve dicho polímero mediante ácido acético (C₂H₄O₂), para a continuación mezclarlo con un precursor de sílice (Si) y así generar el entrecruzamiento de las cadenas poliméricas. Tras realizar la presente mezcla, se lo somete a un proceso de secado, para finalmente obtener la membrana híbrida requerida. Como se observa, se trata de un procedimiento bastante sencillo y económico, ya que no requiere de reactores biológicos costosos, ni procesos que requieran importantes temperaturas.

Su empleo en las celdas poliméricas, es similar a las compuestas por Nafion, es decir, a partir de la membrana se colocan los dos electrodos (ánodo y cátodo), los cuales emplean polvos manométricos de grafito mezclados con un componente activo de platino (Pt) o rutenio (Ru) como electro-catalizadores. Seguido, se colocan las placas difusoras de tela, para así absorber los gases, por un lado el hidrógeno y por otro el oxígeno. A continuación, dichas placas han de plancharse para permitir su contacto y poder colocar el resto de componentes explicados anteriormente.

Como ya se ha estudiado anteriormente, la mayoría de las celdas de combustible poseen una vida útil delimitada por sus materiales y componentes, por lo cual juega otro punto más a favor sobre el quitosán, ya que debido a su naturaleza, a pesar de no ser tóxico, proporciona una vida útil a la celda mayor que el Nafion.

En sus inicios, consistía en un material de difícil manejo, ya que se que hasta entonces, había sido poco estudiado. Sin embargo, dicha investigación demostró que mediante el empleo de esta clase de membranas, es posible desarrollar pilas de combustible 100% sustentables, reduciendo así los costos de producción energética dentro de esta rama. (30)

Por otro lado, se encuentra que este tipo de membranas poseen otra gran cantidad de aplicaciones dentro del campo tecnológico, tales como en equipos de almacenamiento energético, en tratamientos de agua o en memorias y chips de computadoras.

El estudio de dicha membrana polimérica, fue dirigido por Claudia Alicia Cortés Escobedo a través del Centro de Investigación e Innovación Tecnológica (CIITEC) del IPN, en un proyecto denominado "Vivienda Sostenible de la Red de energía del IPN" y publicado en 2012 en la revista científica "Procedia Engineering" con el nombre de "Synthesis and Characterization of Chitosan Membranes for Application in PEMFC". (30)

3.23.2.7.1.7.3.-Membrana grafeno defectuoso en pilas de combustible poliméricas.

El grafeno, como se estudiará posteriormente, consiste en un material compuesto por carbono (C) puro, en el cual sus átomos se encuentran dispuestos formando un patrón hexagonal regular. Ahora bien, si dentro de la estructura del grafeno se realizan orificios compuestos por cuatro átomos de carbono, de esta manera se obtiene una membrana selectiva de protones, lo cual lo convierte en un importante componente de las membranas electrolíticas, para las celdas de hidrógeno (H₂).

Esta membrana, posee un espesor de tan sólo un átomo de carbono de grosor, permitiendo transportar protones en décimas de segundo, por lo que se trata de una membrana electrolítica de mayor eficiencia que las actualmente empleadas con Nafion.

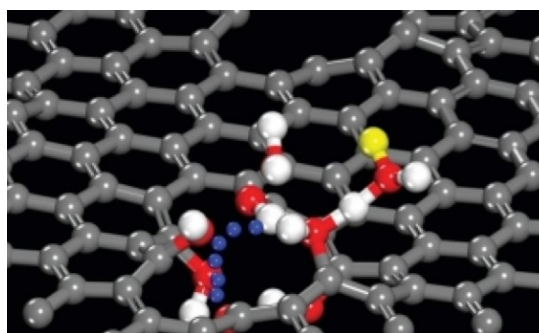


Figura 110: Estructura de la membrana de grafeno con orificios de cuatro átomos de carbono.

Fuente: www.northwestern.edu

Hasta la actualidad, uno de los principales inconvenientes a la hora de hacer viable a grandes escalas la tecnología de las pilas de combustible en la automoción, se trataba

de separar de manera eficiente los protones del hidrógeno (H₂), por lo que se requería de costosos materiales, los cuales ya se han estudiado en el presente estudio. Sin embargo tras el estudio sobre este tipo de membrana, realizado por un grupo de científicos en la Universidad de Northwestern, se demostró que el grafeno de una sola capa permite que los protones se desplacen a través de éste de forma muy eficiente. Para estudiar dicho fenómeno a escala del laboratorio, se emplearon técnicas láser y simulaciones a través de computadoras. (31)

De esta manera se ha podido observar, que el efecto ocurrido en el grafeno cuando le falta un átomo de carbono en su estructura, genera tal reacción química, en la cual los protones de un lado de la membrana son transportados al otro extremo en unos pocos segundos. A su vez, los investigadores han destacado a través de los cálculos realizados, que a partir de un micrómetro cuadrado de superficie de grafeno ya da comienzo dicho fenómeno.

Finalmente, otra de sus importantes ventajas que cumple este tipo de membrana frente a las otras clases, es su importante grado de selectividad, debido a que sólo permiten el paso de los protones a través los orificios generados por los cuatro átomos de carbono (C).

El presente prototipo, ha sido desarrollado y dirigido por parte de Franz M.Geiguer, a través de la Universidad de Northwestern, en un estudio denominado " Aqueous Proton Transfer Across Single Layer Graphene", el cual fue publicado en la revista Nature Communications en 2015. (31)

3.23.2.7.1.8.-Sistema compuesto por la membrana y el electrodo (MEA).

En gran parte de los modelos de este tipo de pilas, las dos capas catalíticas y las otras dos capas difusoras de las membranas poliméricas, se encuentran conjuntamente formando una única estructura, el denominado sistema de membrana y electrodo. (8)

Estas dos capas catalíticas, se pueden depositar mediante el empleo de los diferentes métodos existentes, bien sobre ambas caras de una membrana polimérica dando lugar a un sistema de tres capas, o bien sobre las caras de las dos capas difusoras. En ambos métodos, para la formación de un sistema entre membrana y electrodo compuesto de cinco capas, se debe utilizar un sistema de presión que se realiza bien en frío o por el contrario, en caliente. En los siguientes párrafos, se explican los dos procesos anteriormente mencionados. (7)

1. *Preparación de los electrodos de manera individual:* Mediante este primer método, el electro-catalizador se ha de depositar a través del empleo de alguna de las técnicas disponibles a día de hoy sobre un material poroso de carbón, el cual es conductor. Por ejemplo, un papel de carbón. Las tres principales técnicas más empleadas para este proceso son el pintado, la serigrafía y la aerografía. En ciertas ocasiones, a este material se le añade una solución de Teflón, debido a que contiene una serie de características hidrofóbicas que le ayudan a expulsar el agua generada en la superficie del electrodo. También se le puede adicionar con una capa difusora que proporcione una mayor distribución de los gases reactantes. En un último paso, se realiza el ensamblaje con la membrana, empleando un proceso de prensado en caliente. Ésta técnica es llevada cabo a una temperatura que ronda los 408Kº.

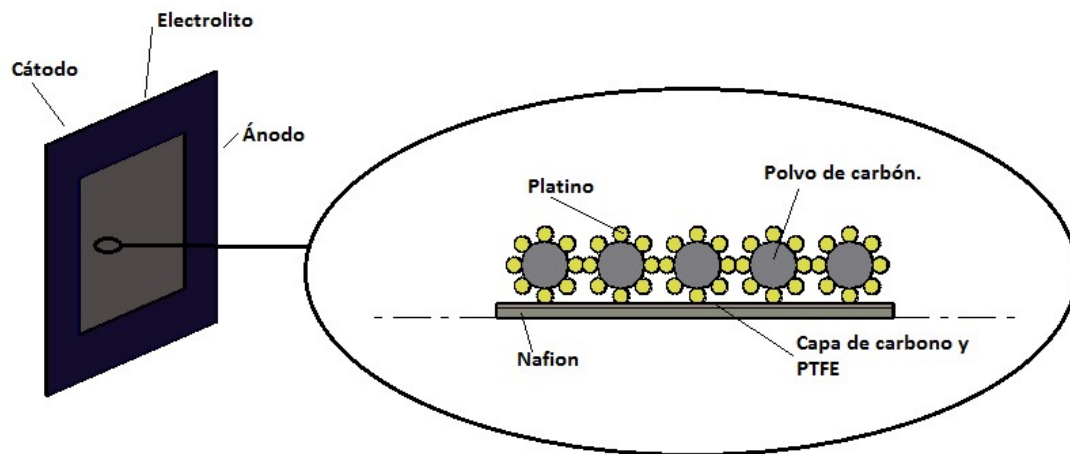


Figura 111: Sistema de membrana y electrolito en Auto CAD.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

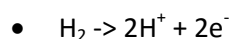
2. *Preparación de los electrodos directamente sobre la membrana:* En este segundo método, el electro-catalizador es depositado directamente sobre la membrana, dando lugar por un lado al ánodo y por el otro al cátodo. A continuación, se le puede aplicar una capa difusora sobre un papel de carbón, al igual que con el método anterior. Realmente, esta capa difusora de gases se trata de algo más que de una simple capa de difusión para gases, ya que a su vez funciona como conector eléctrico entre el electro-catalizador y la placa bipolar. Además, también permite eliminar el agua de la superficie de la membrana, para así formar una capa protectora de la capa catalítica. Finalmente, se ha de expresar que esta capa catalítica puede o no, formar parte del sistema de membrana y electrodo.

El resultado final proporcionado por ambos métodos, es muy similar, por lo cual se posee una gran indiferencia a la hora de elegir entre uno de estos dos métodos.

3.23.2.7.2.-Reacciones en una celda de combustible polimérica (PEMFC).

Como se menciona anteriormente, este tipo de celdas de combustible transforman la energía química liberada en la reacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno, en energía eléctrica. A continuación se muestran las reacciones que tiene lugar en el interior de las celdas poliméricas.

-En un primer lugar, el hidrógeno (H₂) es liberado sobre el ánodo del conjunto formado por el electrodo y la membrana, dividiéndose a continuación en electrones y protones, mediante la ayuda de un catalizador.



-En un segundo lugar los protones (p⁺) atraviesan la membrana llegando al lado del cátodo.

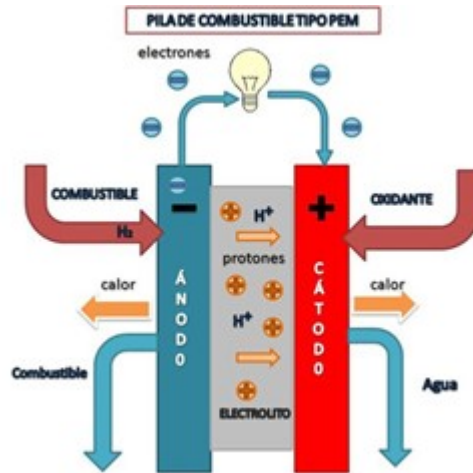
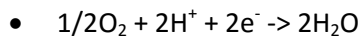


Figura 112: Esquema de una celda de combustible PEM.

Fuente: www.energiasrenovablesinfo.com

-En un tercer lugar, los electrones (e⁻) viajan a través de un circuito externo, que al llegar al cátodo se encuentran con los protones y con el oxígeno (O₂). Producto, se combina con éstas partículas dando lugar al agua (H₂O).



Para un mayor conocimiento dentro del campo de este tipo de celdas, se procederá en el siguiente apartado, al análisis preciso del proceso que llevan a cabo este tipo de tecnologías. (7)

3.23.2.7.3.-Proceso ideal en el interior de una celda de combustible polimérica (PEMFC).

El funcionamiento ideal en una celda de combustible de estas características, depende fundamentalmente de las reacciones electroquímicas, las cuales han sido tomadas en el apartado anterior.

Para la definición de su funcionamiento ideal, se emplea la ecuación de Nernst, la cual permite expresar el potencial generado por la celda. (28) Esta ecuación viene definida por los siguientes parámetros:

Tabla 9: Parámetros de la expresión de Nernst.

$E = E^0 + ((RT/2F) * \ln(P_{H_2}/P_{H_2O})) + ((RT/2F) * \ln(P_{O_2}))$	
• Ecuación 3: Expresión de Nernst.	
1.	E, es el potencial ideal de equilibrio, en voltios (V).

2. E⁰, consiste en el potencial ideal estándar, en voltios (V).
3. R, es la constante del gas a tratar.
4. T, es la temperatura absoluta con la que se trabaja, en K^o.
5. F, se trata de la constate de Faraday, con un valor equivalente a 96487 C^o/mol.
6. P, son presiones tanto de los reactivos como de los productos, en atmósferas (atm.)

Esta ecuación proporciona una relación entre el potencial ideal estándar (E⁰) para la reacción de la celda y entre el potencial ideal de equilibrio (E), a diferentes temperaturas y presiones parciales de productos y reactivos.

El potencial ideal estándar (E⁰), expresa un valor para condiciones estándar de 1 atmósfera a 298 K^o. Tras conocer el potencial ideal estándar (E⁰), la tensión ideal puede ser obtenida mediante la ecuación anterior, para diferentes valores de presión y temperatura.

De acuerdo a la ecuación de Nernst, el potencial ideal, a una determinada temperatura, puede ser incrementado mediante el empleo de elevadas presiones en los reactivos, por lo que a su vez, su eficiencia se ve incrementada.

Por el contrario, para poder emplear esta ecuación, se debe de calcular con anterioridad el potencial ideal estándar (E⁰). El cálculo del potencial máximo del proceso electroquímico en una pila de combustible, conlleva evaluar las diferencias energéticas entre el estado inicial de los reactivos durante el proceso, es decir, el hidrógeno (H₂) y el oxígeno (1/2O₂), junto con el del agua (H₂O) como producto. Esta evaluación, depende de una serie de funciones termodinámicas de estado, en un proceso químico. Se trata principalmente de la energía libre de Gibbs. (28)

El cambio de energía libre de Gibbs en una reacción electroquímica de una celda de combustible operando a temperatura y presión constante, se puede obtener por la siguiente expresión. Esta energía obtenida es equivalente al trabajo eléctrico generado en una celda de combustible polimérica (PEMFC).

Tabla 10: Parámetros de la energía libre de Gibbs.

$W_{el} = \sum G = -n \cdot F \cdot E_{celda}$	
• Ecuación 4: Energía libre de Gibbs.	
1.	n, es el número de electrones (e ⁻) participantes en la reacción.
2.	F, se trata de la constante de Faraday, con un valor equivalente a 96487 C ^o /mol.
3.	E _{celda} , consiste en el potencial ideal de dicha celda, en voltios (V).
4.	W _{el} , es el trabajo máximo eléctrico de la celda, en julios (J).

Si se considera que tanto los reactivos como los productos están en sus estados estándar, la variación de energía anterior queda considerada por la expresión mostrada a continuación.

Tabla 11: Parámetros de la energía libre de Gibbs estándar.

$W_{el}^o = \sum G^o = -n \cdot F \cdot E_{celda}^o$	
Ecuación 5: Energía libre de Gibbs estándar.	
1.	n, es el número de electrones (e ⁻) participantes en la reacción.
2.	F, se trata de la constante de, con un valor equivalente a 96487 C ^o /mol.
3.	E ^o _{celda} , consiste en el potencial ideal estándar de dicha celda, en voltios (V).
4.	W _{el} , es el trabajo máximo eléctrico estándar de la celda, en julios (J).

La reacción de una celda de combustible polimérica, puede emplearse tanto para generar corriente eléctrica como energía calorífica, por lo cual, el máximo trabajo disponible en una fuente de combustible, se encuentra ligado a la energía libre de la reacción. A su vez, la cantidad entalpía en la reacción, se calcula de manera equivalente a la de cualquier otra máquina térmica. (28)

Tabla 12: Parámetros de la energía libre de la celda, a través de la entalpía y entropía.

$W_{el} = \sum G = \sum H - (T \cdot \sum S)$	
Ecuación 6: Energía libre de la celda, a través de la entalpía y entropía.	
1.	H, es la entalpía, mediada en julios por mol (J/mol).
2.	S, se trata de la entropía, en J/(mol·K ^o).
3.	W _{el} , es el trabajo generado por la celda.

En la ecuación anterior, se puede observar que la diferencia entre el trabajo realizado (W_{el}) y el incremento de entalpía (H), es directamente proporcional al cambio de entropía (S), considerando a la energía térmica totalitaria como el incremento de entalpía (ΣH). Al mismo momento, se le otorga al producto entre la temperatura de funcionamiento (T) y la variación de entropía (ΣS), el significado de cantidad de calor generado por una pila de combustible de ésta clase, operando de manera reversible.

Las reacciones contenidas en una variación de entropía negativa, aportan calor al entorno, mientras que las de valor positivo, pueden extraer el calor de su entorno si la generación irreversible de calor es menor que su absorción reversible. Por lo tanto de las explicaciones anteriores, se ha deducido que el potencial máximo para las reacciones producidas en el interior de una celda polimérica, a una temperatura y a una presión determinada, se puede calcular mediante la siguiente función.

Tabla 13: Parámetros del potencial máximo generado en una pila de hidrógeno de tipo polimérica (PEMFC).

$\sum E = -\sum G / (n \cdot F)$	
Ecuación 7: Potencial máximo generado en una pila de hidrógeno de tipo polimérica (PEMFC).	

1. E, es el potencial máximo en voltios (V).
2. G, es trabajo generado por la celda, el julios (J).
3. n, se trata del número de electrones (e⁻) participantes en la reacción.
5. F, consiste en la constante de Faraday, con un valor equivalente a 96487 C^o/mol.

Diferentes estudios y modelos de celdas de hidrógeno (H₂), muestran que el potencial ideal en condiciones reales de operación se aproxima en torno a 1V. (9) En el apartado de los cálculos del presente estudio se realiza la comprobación de estos cálculos.

3.23.2.7.4.-Proceso real en el interior de una celda de combustible polimérica (PEMFC).

El proceso estudiado en el apartado anterior, se trata de un análisis teórico realizado en condiciones en las cuales la corriente posee un valor nulo, es decir, con el circuito eléctrico abierto. Por el contrario, el potencial real que se obtienen en este tipo de celdas de hidrógeno, se encuentra por debajo de los valores teóricos ya que en el proceso se generan una serie de pérdidas, como en la gran mayoría de los mecanismos tecnológicos. (29)

Las numerosas fuentes generadoras de dichas pérdidas, tiene su origen fundamentalmente en las polarizaciones, también denominadas sobretensiones. Fundamentalmente, estas polarizaciones se agrupan en tres apartados, los cuales son la polarización de activación, la polarización óhmica y la polarización debida a concentraciones.

Este conjunto de pérdidas, dan lugar a una caída de tensión frente al valor del potencial ideal. Para poder observarlo de una forma más clara, se presenta a continuación una gráfica, la cual representa el potencial de la celda de combustible frente a la densidad de corriente generada. (9)

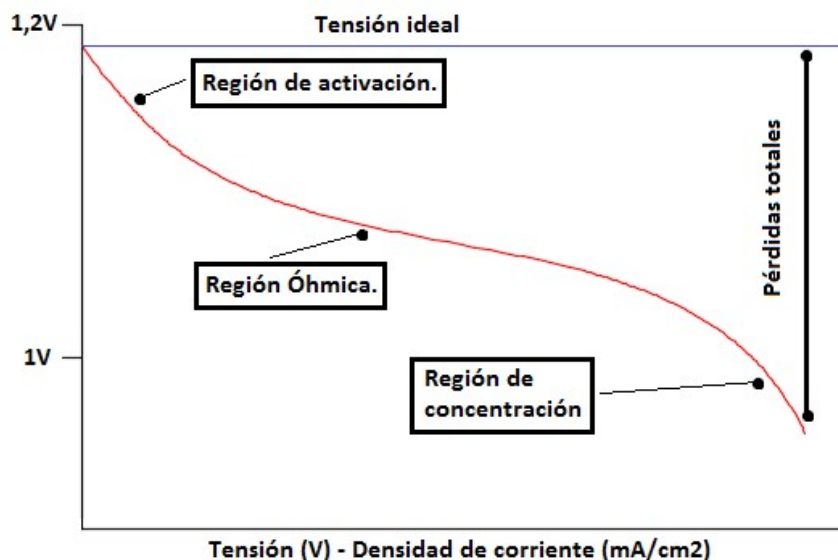


Figura 113: Curva característica entre la tensión (V) y la densidad de corriente (mA/cm²), en una celda de combustible polimérica, teniendo en cuenta las pérdidas de polarización.

Fuente: La figura anterior ha sido realizada por el autor del presente estudio.

1. **Región de activación:** Este tipo de pérdidas se encuentran presentes cuando la velocidad de la reacción presente en la superficie de un electrodo, depende de la cinética del electrodo empleado, es decir, es dependiente del porcentaje de reacciones electroquímicas que tienen lugar. Esto se debe a que las reacciones electroquímicas poseen una barrera energética, que de no ser superada la reacción no tiene lugar. Como se observa en la figura, generan caídas de tensión de poco valor, en bajas densidades de corriente.
2. **Región óhmica:** Las pérdidas óhmicas, son generadas por la resistencia que ofrecen tanto el flujo iónico en el electrolito, como el flujo de electrones a través de los materiales empleados en los electrodos. Como se puede verificar en la gráfica, se trata de las pérdidas más importantes, ya que se producen a través del electrolito, por lo que para su reducción se debe disminuir la separación entre los electrodos y optimizando la conductividad iónica en el electrolito. También se ha de tener en cuenta que tanto el electrolito como los electrodos obedecen a la ley de Ohm, por lo cual estas pérdidas se pueden expresar como el producto entre su resistencia y la intensidad de corriente que los atraviesa.
3. **Región de concentración:** Esta última clase de pérdidas, se deben a que los reactivos son consumidos en el electrodo por parte de una reacción electroquímica, por lo cual aparece una pérdida de potencial generada por la incapacidad del material circundante de mantener la concentración inicial de gran parte del fluido. Por esta razón, se genera un gradiente de concentraciones. Generalmente, aparecen en las etapas de una celda de combustible, tales como en la difusión de la fase gaseosa entre los poros contenidos en los electrodos, en la solución entre los reactivos y los productos en el electrolito, o en la difusión entre éstos a través del electrolito. Como se observa en la figura, a valores de densidad de corriente habituales, el transporte lento de los reactivos y de los productos, proporciona una elevada contribución a la polarización por concentración.

Para la explicación de la influencia por parte de esta clase de pérdidas sobre la disminución del potencial de salida en las celdas de hidrógeno, se han de tener en cuenta en un primer lugar, que las polarizaciones de activación y de concentración, pueden existir tanto en el ánodo como en el cátodo. Por lo tanto, se tienen las dos siguientes ecuaciones. (28)

Tabla 14: Pérdidas por polarización.

$N_{\text{ánodo}} = N_{\text{activación en el ánodo}} + N_{\text{concentración en el ánodo}}.$	
•	Ecuación 8: Pérdidas de polarización en el ánodo.
$N_{\text{cátodo}} = N_{\text{activación en el cátodo}} + N_{\text{concentración en el cátodo}}.$	
•	Ecuación 9: Pérdidas de polarización en el cátodo.
1.	N, es considerada como las pérdidas por polarización (V).

El efecto generado por la polarización, da lugar a una variación sobre el potencial del electrodo ($E_{\text{electrodo}}$), por lo que se obtienen los siguientes resultados en las ecuaciones que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 15: Variaciones de potencial en el ánodo y en el cátodo.

$V_{\text{ánodo}} = E_{\text{ánodo}} + N_{\text{ánodo}} $	
• Ecuación 10: Variación de potencial en el ánodo.	
$V_{\text{cátodo}} = E_{\text{cátodo}} - N_{\text{cátodo}} $	
• Ecuación 11: Variación de potencial en el cátodo.	
1. N, es considerada como las pérdidas por polarización (V).	
2. V, es el potencial del electrodo, una vez aplicadas las pérdidas de polarización (V).	
3. E, se trata del potencial en el electrodo (V).	

El resultado neto sobre el flujo de corriente en una pila de combustible, consiste en incrementar el potencial del ánodo y disminuir el potencial del cátodo, reduciendo de esta forma el potencial de la celda. A la hora de considerar este último valor, se le ha de contribuir los potenciales del ánodo y del cátodo, junto con la polarización óhmica.

Tabla 16: Potencial en la celda.

$V_{\text{celda}} = V_{\text{cátodo}} - V_{\text{ánodo}} - (I \cdot R)$	
• Ecuación 12: Potencial de la celda de hidrógeno.	
1. V, son las tensiones de la celda, ánodo y cátodo respectivamente, en voltios (V).	
2. I, se trata de la intensidad de corriente que atraviesa la celda, en amperios (A).	
3. R, considerada como la resistencia total de la celda en ohmios (Ω).	

Si ahora se sustituyen la ecuación anterior dentro de las de la variación de potencial en los electrodos (ecuaciones 10 y 11), se obtiene la función final que proporciona un valor real del potencial de salida en una celda de combustible.

Tabla 17: potencial real en la celda.

$V_{\text{celda}} = \sum E_e - N_{\text{ánodo}} - N_{\text{cátodo}} - (I \cdot R)$	
• Ecuación 13: Potencial final de la celda de combustible.	
1. V_{celda} , es la tensión real proporcionada por la celda de hidrógeno, en voltios (V).	
2. $\sum E_e$, consiste en la variación entre el potencial del cátodo y el del ánodo, en voltios (V).	
3. N, es considerada como las pérdidas por polarización (V).	
4. I, es la intensidad de corriente que atraviesa la celda, en amperios (A).	
5. R, se trata de la resistencia total de la celda en ohmios (Ω).	

La anterior ecuación, muestra que el flujo de corriente eléctrica a través de una pila de hidrógeno, posee como resultado una disminución en el potencial de dicha celda, debido a los tres tipos de pérdidas estudiados anteriormente. El valor de este conjunto de pérdidas en el potencial de una celda polimérica se encuentra al rededor de un 20% de su valor. (9)

Como principal objetivo de los fabricantes, se contempla la búsqueda de disminuir estas pérdidas, de manera que el potencial final de éstas (V_{celda}), se aproxime a la diferencia de potencial entre ambos electrodos ($\sum E_e$). Para ello, se realizan modificaciones en el diseño de las pilas de combustible, mejorando la estructura de los electrodos, de los electrocatalizadores, de los electrolitos, entre otros de sus componentes.

Cuando se tiene un determinado diseño de celda, la mejora de su funcionamiento se ha de realizar optimizando las condiciones de operatividad, tales como un incremento en la presión de los gases, una mayor temperatura, modificaciones dentro de la composición de los gases o una menor concentración de impurezas. Sin embargo, para cualquier modelo de pila de combustible, los compromisos existentes entre lograr un óptimo funcionamiento con elevadas presiones o temperaturas y entre los problemas asociados a su durabilidad y estabilidad, tropiezan con las más severas condiciones.

3.23.2.7.5.-El Stack, la unión entre varias celdas de combustible.

Mediante el empleo del proceso de ecuaciones explicado anteriormente, se ha demostrado que aplicando una serie de valores normalizados, se obtiene un tensión media que ronda aproximadamente el voltio, junto con una intensidad de corriente, la cual depende principalmente del catalizador empleado. Sin embargo, para las aplicaciones que tiene como objeto este estudio, se necesita una mayor tensión y por lo tanto, una mayor potencia, lo cual es conseguido mediante la unión de varias celdas individuales de combustible. A este proceso se le denomina Stack, o apilamiento de celdas elementales, dando lugar a una pila de combustible. (8)

Su conexión es realizada en serie, ya que de esta manera, el potencial de la pila (V) genera un aumento considerable en su valor. Esta interconexión es realizada mediante una serie de placas bipolares, tales como las que se explicaron anteriormente. En ésta interconexión, las placas bipolares, poseen un canal en cada lado de su área activa, por el cual fluye por un lado el combustible y por el otro el oxidante. De esta manera, una cara de la placa conecta con el ánodo de una celda y la otra con el cátodo de la siguiente celda. Mediante esta técnica se logra un ahorro tanto su peso, como en sus dimensiones. (7) En la siguiente figura se muestra como tiene lugar esta unión de varias celdas individuales.

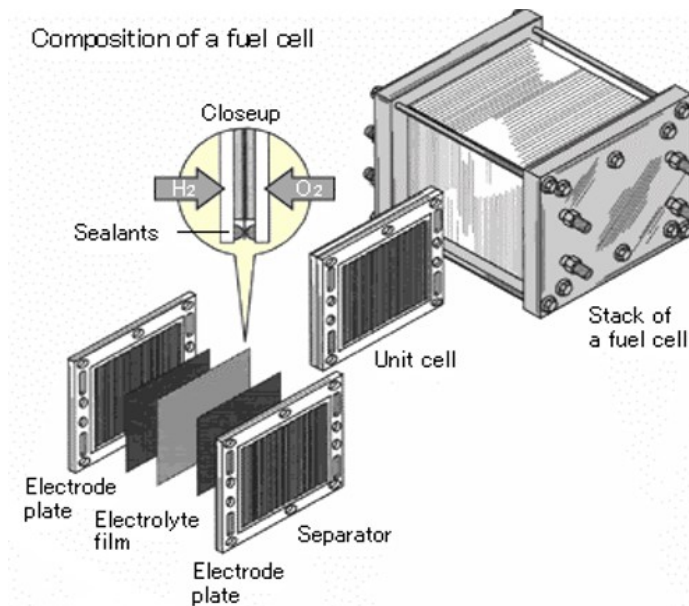


Figura 114: Apilamiento de varias celdas de combustible poliméricas.

Fuente: www.energia2012.es

Se trata de un complicado proceso, debido a que su manufacturación y su maquinado representan altos costes, sin olvidar también, que la búsqueda de finas placas para reducir tanto su peso como sus dimensiones, da lugar a una disminución en su resistencia eléctrica, haciendo de éstas un componente bastante frágil. Por lo tanto es un proceso que requiere un trato especialmente cuidadoso.

A su vez, el ensamblaje de placas debe poseer una disposición que asegure el contacto eléctrico de manera óptima entre los electrodos y el área activa de los canales. Para evitar la generación de cortocircuitos, se ha de colocar un aislamiento total entre las placas. Por lo tanto, además del apilamiento, las pilas de combustible requieren de una serie de componentes básicos, los cuales se muestran a continuación.

3.23.2.7.5.1.-Las placas bipolares.

Este tipo de placas, poseen la función en el Stack de actuar como conductor tras recibir la energía de los electrodos. También, han de distribuir el flujo de hidrógeno (H₂) y los demás gases, asegurando una importante cantidad de éstos en la membrana. Para evitar determinadas fugas de gases, estas placas se fabrican mediante complejos procesos, para dar lugar a materiales no porosos.

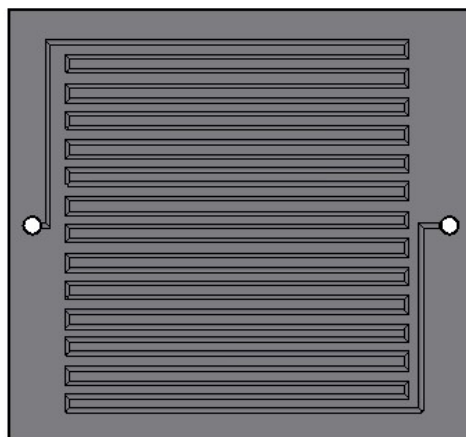


Figura 115: Esquema de una placa bipolar en AutoCAD, con disposición de canales paralelos en un Stack de pilas de combustible poliméricas.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Estudios recientes, han demostrado que los canales que componen esta clase de placas, deben de tener un diámetro de alrededor de 1,5 mm, para optimizar la distribución en la densidad de consumo y reducir así las pérdidas de carga. En cuanto a la separación de los canales, ésta debe ser mínima, para reducir consumos de combustible. (28)

Por el contrario, también se ha demostrado que una reducción en su anchura, incrementa estas pérdidas, al igual que su consumo. Finalmente, se concluyó que la mejor disposición de dichos canales en las placas bipolares, se obtienen mediante una disposición paralela de éstos, basándose en la optimización de su distribución y en la reducción de las pérdidas de carga.

3.23.2.7.5.2.-Las placas de cierre.

Este elemento en un Stack de una pila de combustible, posee la funcionalidad de la protección y el cierre hermético de la pila, por lo que debe de estar diseñado de tal manera que proporcione un apriete homogéneo de todos sus componentes interiores. A su vez, van acompañados de los colectores, los cuales permiten la entrada y la salida de los diferentes fluidos que intervienen en una pila de combustible.

Por el contrario, si se tiene un cierre ineficiente frente a los diferentes componentes, pueden aparecer ciertas fugas al exterior por parte de los gases reactantes, lo cual genera una serie de peligros. Al igual que se producen fugas, también se incrementarían las resistencias de contacto, dando lugar a un decremento en la eficiencia global de la pila de combustible. Las placas terminales, deben llevar incorporados las conexiones a los conductos de entrada y salida para los reactivos y los productos respectivamente. (28)

3.23.2.7.5.3.-Las placas refrigeradoras.

Se trata de una serie de placas sencillas fabricadas de titanio (Ti), las cuales se encuentran situadas junto con las placas bipolares. Para su colocación, se deben introducir entre varias celdas apiladas, ya que por uno de sus laterales circula un reactante, mientras que por el otro lo hace el fluido refrigerante, para así poder extraer el calor generado por la pila.

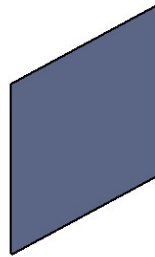


Figura 116: Placa refrigeradora de titanio (Ti), en Auto CAD.

Fuente: esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

En ciertos modelos de pilas de combustible poliméricas, éstas no poseen este tipo de elementos, debido a que sus placas bipolares realizar ésta función, reduciendo de esta manera su peso y su tamaño. (28)

3.23.2.7.5.4.-Parámetros y dimensionamiento de un Stack de pilas de combustible.

Inicialmente, a la hora de diseñar el Stack en una pila de combustible polimérica, se ha de calcular la superficie de su área activa, junto con el número de unidades que la formarán. Para una determinada aplicación, los datos del diseño vienen impuestos por los requerimientos de la aplicación, a la cual se la va a entregar la energía eléctrica generada. Éstos son fundamentalmente la tensión y la potencia, quedando fijada la corriente generada por siguiente expresión. (9)

Tabla 18: Intensidad total establecida en una pila de combustible.

$I_{total} = P/V_{total}$	
• Ecuación 14: Intensidad total establecida en una pila de combustible.	
1.	I_{total} , es la intensidad total en una pila de combustible, en amperios (A).
2.	P, consiste en la potencia de dicha pila, en vatios (W).
3.	V_{total} , es el potencial total de la pila de combustible, en voltios (V).

Para el cálculo de la tensión total (V_{total}) en el proceso de apilamiento en serie de las celdas, se realiza bien mediante la suma de todos los potenciales individuales, o bien por el producto entre el potencial promedio y el número total de celdas.

Tabla 19: Potencial total de la pila de combustible.

$V_{\text{total}} = \sum V_{\text{celda}} = V_{\text{celda}} * n^{\circ}$	
Ecuación 15: Potencial total de la pila de combustible.	
1.	V_{total} , es el potencial total de la pila de combustible (V).
2.	V_{celda} , es la tensión de cada celda (V).
3.	n° , se trata del numero de celdas que componen la pila.

A su vez, el área activa del electrodo, se puede calcular mediante la siguiente expresión.

Tabla 20: Área efectiva del electrodo.

$A_{\text{electrodo}} = I_{\text{total}} / j$	
Ecuación 16: Área efectiva del electrodo.	
1.	$A_{\text{electrodo}}$, se trata del área efectiva del electrodo, en centímetros cuadrados (cm ²).
2.	j , es la densidad de corriente, cuyo valor oscila entre los 0,3 y los 0,5 A/cm ² .

El potencial de la pila y la densidad de corriente, de manera general no son parámetros independientes, ya que se encuentran relacionados a través de la curva de polarización. Estas curvas, normalmente se determinan de forma experimental en bancos de ensayos. Para ello, se demandan a la pila diferentes potencias empleando cargas electrónicas dinámicas. A continuación, se muestra un ejemplo de curvas de polarización, para un apilamiento de celdas de combustible poliméricas en Stack.

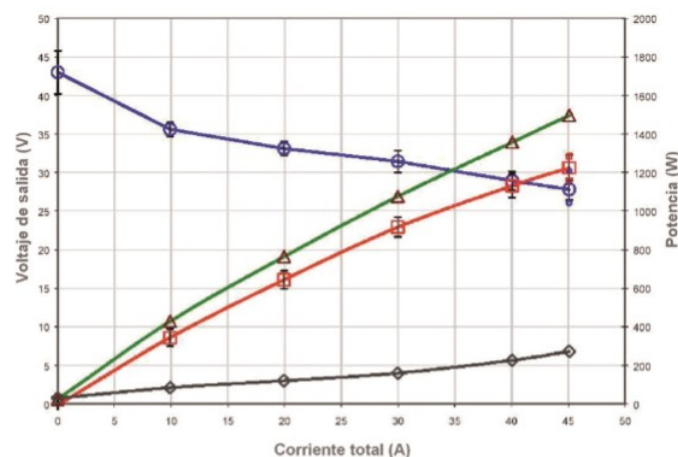


Figura 117: Ejemplo de una curva de polarización en un apilamiento de celdas de combustible poliméricas en Stack, mediante una demanda de diferentes potencias aplicadas a la pila en un banco de ensayos.

Fuente: www.energia2012.es

Por último, se ha de tener en cuenta que tanto el número de celdas, como el tamaño de su área activa poseen límites físicos y tecnológicos, ya que un elevado número de celdas con pequeños tamaños de áreas activas, dificultan el alineamiento y el ensamblaje de la pila.

En el caso opuesto, un reducido número de unidades individuales con grandes áreas activas, genera una elevada combinación entre la corriente y el bajo potencial, por lo cual se incrementan las pérdidas resistivas en los cables de conexión.

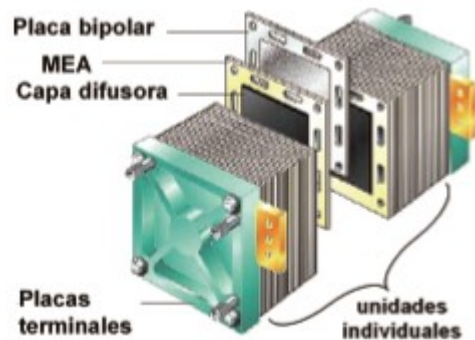


Figura 118: Apilamiento de una serie de celdas de combustible poliméricas en Stack.

Fuente: www.energia2012.es

Hasta día de hoy, se han empleado satisfactoriamente pilas de entre 200 y 250 celdas con áreas activas de 1.000 cm², a pesar de que el rango más común de trabajo está entre los 50 y los 600 cm². Para grandes áreas activas de electrodo, es muy complicado garantizar una uniforme distribución por parte de los gases reactantes sobre las capas catalíticas, ya que el número máximo de celdas se encuentra limitado por las fuerzas de compresión, su rigidez estructural y la pérdida de presión tras la circulación de los gases a través de los diferentes conductos del sistema. (9)

Una vez estudiado todas las clases de celdas de combustible empleadas hasta la actualidad, en especial las de tipo poliméricas, ya que son las que mayor interés poseen dentro del presente estudio, se procede a exponer una tabla, la cual muestra de forma resumida las propiedades ya estudiadas de los diferentes tipos de celdas.

Tabla 21: Propiedades de los diferentes tipos de celdas de combustible.

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolito.	KOH	Membranas con intercambio de protones.	Membranas con intercambio de protones.	H ₃ PO ₄	Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃	ZrO ₂ /Y ₂ O ₃
Temperatura en °C.	100/250	80/100	50/120	205	600	600/1000
Conductor iónico.	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ⁼
Ánodo.	Ni	Pt/C	Pt-Ru/C	Pt/C	Ni	Ni-ZrO ₂
Cátodo.	Ag	Pt/C	Pt/C Mo ₂ Ru ₅ S ₅	Pt/C	NiO	LaMnO ₃ /Sr
Matriz.	Asbestos	-	-	SiC	LiAlO ₂	-
Tiempo de encendido (en horas).	<0,1	<0,1	<0,1	1-4	5-10	-
Densidad de potencia (mW/cm²)	620	420	-	250 (a 8 atm)	>150	120
Densidad de corriente (mA/cm₂)	420/1000	500	100/800	300	170/300	350/400
Eficiencia (%PCS).	>50	32-45	30-40	36-45	43-55	43-55
H₂.	Combustible	Combustible	Combustible	Combustible	Combustible	Combustible
CO.	Veneno	Veneno (<50 ppm).	Veneno	Veneno (<0,5 ppm).	Combustible	Combustible

CH₄.	Diluyente	Diluyente	Diluyente	Diluyente	Combustible	Combustible
S (H₂S y COS).	Veneno	Veneno	Veneno	Veneno (<50 ppm).	Veneno (<0,5 ppm).	Veneno (<1 ppm).
Rango de potencia (en kW).	5-150	5-250	5	50-11000	100-2000	100-250
Ventajas.	Elevado rendimiento y buenas prestaciones para el espacio.	Elevada densidad de corriente, poco peso, poco tamaño y bajo coste.	Elevada disponibilidad de combustible y no requieren de un almacenamiento voluminoso ni sistema de reformado para el combustible.	Seguras y relativamente eficientes.	Silenciosas y altamente eficientes, siendo ideales en cogeneración.	Elevada eficiencia por lo que se usan en cogeneración.
Inconvenientes.	El electrolito ha de reaccionar con el CO ₂ .	Eficacia aún por incrementar.	Elevadas cantidades de catalizador, para obtener densidades de corriente similares a las poliméricas.	Eliminación de azufre (S) de los gases de alimentación. A su vez, son de elevado tamaño y peso, por lo cual su coste es elevado.	Elevado tamaño, con temperaturas de funcionamiento muy altas y un elevado coste.	Elevado tamaño y con temperaturas de funcionamiento muy altas.
Aplicaciones.	Usos militares de corta duración y proyectos espaciales.	Automovilismo y generación de electricidad y calor.	Generación de energía portátil.	Cogeneración y producción masiva de electricidad.	Cogeneración y producción centralizada de electricidad.	Generación residencial de energía eléctrica y calor.

3.23.3.-Funcionamiento de un vehículo mediante el empleo de hidrógeno (H_2).

Fundamentalmente, existen dos principales clases de automóviles que basan su funcionamiento en el uso de este gas como combustible.

Por un lado, se encuentran los motores de conversión mediante una pila de combustible, tal y como se ha estudiado, los cuales utilizan el hidrógeno (H_2), para generar electricidad. A su vez, se pueden hallar otra serie de vehículos, que emplean dicho gas como si de un combustible convencional se tratara, es decir, lo queman en el interior de un motor de combustión interna. A continuación, se prosigue con el análisis de ambos procesos.

3.23.4.-Vehículos que basan su funcionamiento en pilas de combustible.

En el interior de esta clase de vehículos, mediante una la pila de combustible polimérica, como bien se analizó en el apartado anterior, el hidrógeno (H_2) es transformado en electricidad y agua (H_2O), tras al reaccionar con el oxidante (O_2). Esta electricidad generada, es la encargada de hacer funcionar a una serie motores eléctricos, es decir, funciona al igual que un automóvil con motor eléctrico, con la diferencia de que éstos no requieren su recarga de energía, a través de una conexión a la red eléctrica. (8)

Al emplear un motor de estas características, se logra una importante ausencia de ruido y las emisiones contaminantes en su funcionamiento pueden llegar a ser nulas, dependiendo del origen del hidrógeno en el interior del vehículo.

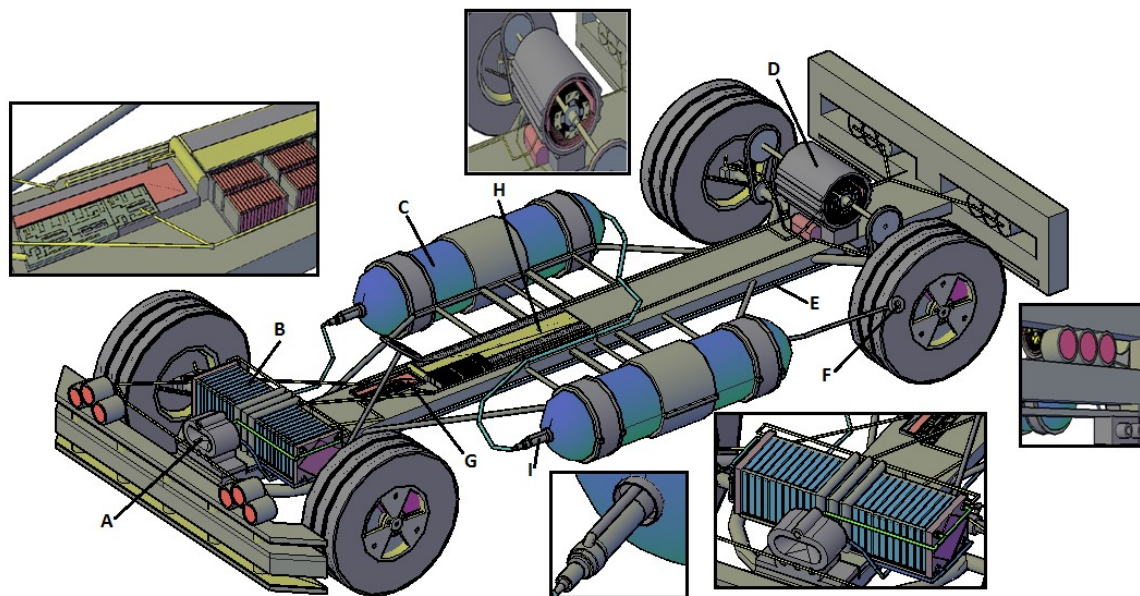
Algunas empresas involucradas en el desarrollo de las pila de combustible, propugnan obtener dicho gas en el interior del mismo transporte, empleando combustibles tales como la gasolina o el metanol, ya que las moléculas de estos hidrocarburos se pueden disociar en hidrógeno (H_2) y carbono (CO_2). Sin embargo, mediante esta técnica, se continúa con la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, a pesar de que los rendimientos en los automóviles aumenten.

Por otro lado, se pueden encontrar otra serie de técnicas para la generación del hidrógeno (H_2) en el interior del vehículo, algunas en pleno desarrollo, tales como el uso de líquidos electrolíticos o mediante la electrólisis, proceso en el que se está trabajando actualmente, para poder reducir los costes del proceso.

En un tercer lugar, otra opción consiste en el surtido directo del hidrógeno a través de las hidrogeneras, las cuales se estudiarán más en concreto en el apartado de generación del hidrógeno. Esta clase de estaciones de servicio, al igual que ocurre con las gasolineras, las electro-líneas o las ferro-líneas, tiene el objetivo de surtir de combustible los depósitos de los automóviles, con la diferencia de que éstas, proporcionan gas hidrógeno (H_2).

3.23.4.1.-Componentes de un vehículo que basa su funcionamiento en una pila de hidrógeno.

En el presente apartado, se procede a estudiar los diferentes elementos que forman el mecanismo de un automóvil, el cual funciona mediante una celda de combustible.



A.	Toma de aire.
B.	Pila de hidrógeno (H ₂).
C.	Depósitos de hidrógeno (H ₂).
D.	Motor eléctrico.
E.	Conductos de escape del H ₂ O.
F.	Toma de entrada del H ₂ .
G.	CPU.
H.	Sistema de almacenamiento energético (Baterías).
I.	Inyectores de H ₂ .

Figura 119: Elementos que componen un vehículo con pila de hidrógeno (H₂).

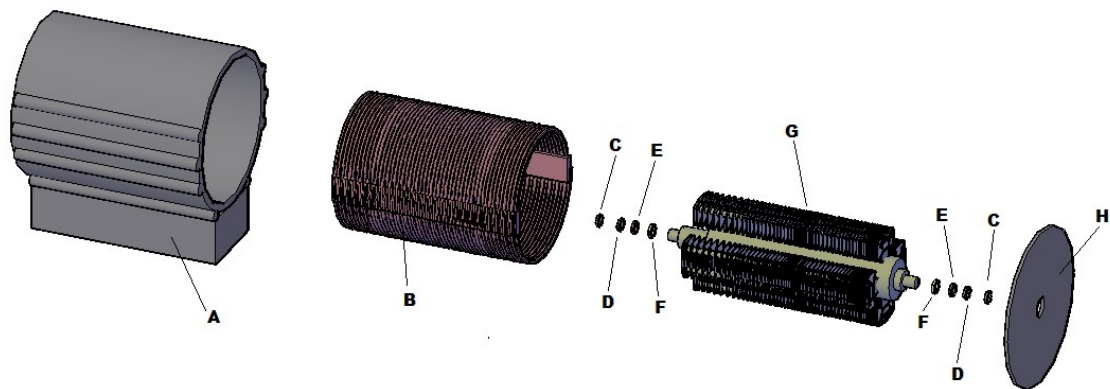
Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

3.23.4.1.1.-Motores eléctricos.

Se trata del único elemento mecánico de entre esta serie de componentes. Son máquinas eléctricas rotatorias, encargadas de convertir la energía eléctrica proporcionada por la pila de combustible, en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas, la cual es necesaria para desplazar al transporte. Para ello, en un motor eléctrico, entre sus diferentes componentes, se encuentran dos fundamentales, los cuales son el núcleo de su funcionamiento, el estator y el rotor. El primero, consiste en el elemento fijo de dicho motor eléctrico, ya que opera como base, permitiendo que se genere la rotación del rotor mediante

inducción electromagnética. El segundo componente, el rotor, es la parte móvil del motor, sirviendo como elemento de transferencia mecánica, ya que de él depende la conversión de energía eléctrica a energía mecánica. Posteriormente, se muestra una figura con los componentes fundamentales que forman un motor eléctrico de estas características.

En motor eléctrico, posee un menor número de piezas mecánicas que un motor de combustión interna, por lo cual son menos propensos a generar fallos, dando lugar a un tipo de motor de elevada comodidad y seguridad. Además, esta clase de motores son los de mayor agilidad, en lo que respecta a su variación de potencia, ya que pueden pasar instantáneamente desde su posición de reposo hasta su máximo funcionamiento. En cuanto a su tamaño, éste es más reducido debido a su menor cantidad de componentes, como pueden ser la no incorporación de un sistema de lubricación y refrigeración por líquido; la admisión de aire; un sistema de escape de gases; y una caja de cambios. A todas estas propiedades, se ha de añadir el nulo efecto que posee este tipo de motores frente al medio ambiente, en lo que a emisiones de gases contaminantes se refiere, al no expulsar ciertos gases como pueden ser el dióxido de carbono (CO₂).



A.	Carcasa del motor.
B.	Estator.
C.	Estribo de fijación.
D.	Arandela de centrifugación.
E.	Rodamiento.
F.	Tapa del cojinete.
G.	Rotor.
H.	Tapa del motor.

Figura 120: Principales componentes que forman un motor eléctrico.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

En el interior de un vehículo de estas características, el motor eléctrico se encuentra posicionado bien sobre el eje delantero, o en algunos modelos sobre el eje posterior, con la función de conducir la energía mecánica hacia los ejes de las ruedas. Existen motores eléctricos de diversos tamaños, dependiendo del tipo de automóvil en el que trabajen.

3.23.4.1.1.1.-Motor eléctrico en cada rueda.

A su vez, en los últimos años, han aparecido otra serie de motores eléctricos, los cuales son instalados en cada rueda del automóvil. De esta manera se libera una gran cantidad de espacio en el interior del transporte, reduciendo su peso y eliminando la transmisión existente entre el motor y las ruedas, proceso en el que se desprecia una importante cantidad de energía. Por lo tanto, mediante su uso, se consigue un 90% de la energía generada por dichos motores, frente al 35% que utiliza un motor convencional.



Figura 121: Motor eléctrico de rueda.

Fuente: www.motorafondo.net

Otra de las ventajas de los motores eléctricos en cada rueda, es la posibilidad de configurar al vehículo con tracción delantera, con propulsión trasera o con tracción total, sin tener que alterar su diseño ni su espacio disponible. Por ello, el fabricante solo debe elegir en que ejes colocarlos y la cantidad de motores a colocar, la cual resulta entre dos y cuatro. A la hora de sincronizar el número de motores de rueda instalados, esta función es realizada mediante una unidad de control electrónica en el automóvil, la cual se encarga del control y estabilidad de todos sus componentes.

En cuanto a su mecanismo y confort de marcha, funcionan de igual manera que el resto de motores eléctricos.

3.23.4.1.2.-Pila de combustible.

Se trata del elemento fundamental de esta tecnología, ya que se encarga de almacenar y generar la energía eléctrica necesaria para dirigir a los motores eléctricos. Como ya se explicó anteriormente con especial atención, genera una reacción química entre el hidrógeno (H₂) y el oxidante (O₂), para dar lugar a electrones (e⁻) y cationes de hidrógeno (H⁺). Es entonces, cuando el desplazamiento de ambas partículas a través de la membrana genera una corriente eléctrica. Finalmente, los iones de dicho gas al combinarse con el oxígeno, forman moléculas de agua (H₂O), la cual es expulsada a través de un conjunto de tuberías, similar al de un sistema de escape de un motor de combustión interna.

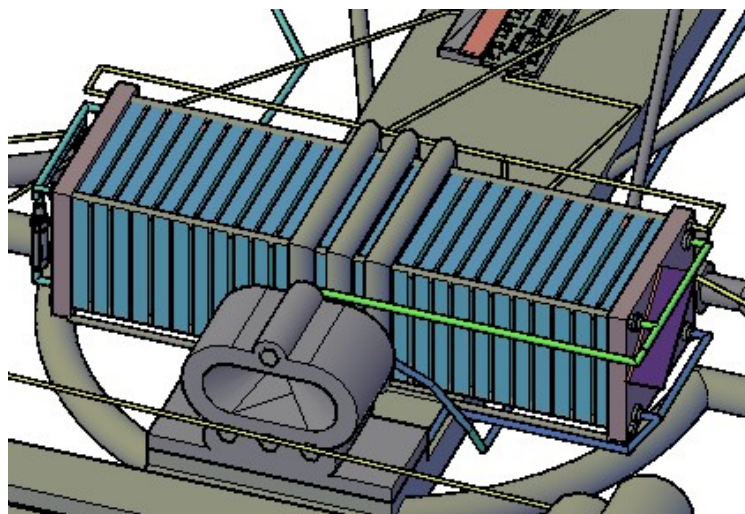


Figura 122: Pila de combustible de un automóvil, en Auto CAD.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Actualmente, las pilas de combustible poseen una alta eficiencia energética, llegando a superar incluso entorno a un 20% a las tecnologías convencionales de combustión, ya que se ha llegado a reunir 400 celdas de combustible por cada pila. Estas celdas, al ser capaces de generar alrededor de 1V por cada una, su conexión en serie ha permitido lograr la obtención de los 4kW por litro o kilogramo de combustible administrado. A su vez, son capaces de emplear las variaciones de presión, para así modificar su intensidad de corriente y lograr que la potencia alcance el motor. (9)

3.23.4.1.3.-Depósitos de almacenamiento de hidrógeno (H₂).

A día de hoy, estos depósitos de almacenamiento son uno de los puntos que se encuentran en estudio y desarrollo, a pesar de que ya existen ciertos prototipos los cuales se comercializan para su uso en automóviles.

El almacenamiento del hidrógeno (H₂) para su uso en automoción, se encuentra sometido ante fuertes restricciones en cuanto a su peso y a su volumen, existiendo unos límites mínimos de cantidad de hidrógeno almacenado que deben alcanzarse para que los vehículos logren autonomías equivalentes a los vehículos convencionales.

También existen otro tipo de restricciones en cuanto a condiciones de operación y cinética de suministro de dicho combustible, las cuales condicionan su uso combinado con pilas de combustible. Por lo tanto, los requisitos de un sistema de almacenamiento de hidrógeno en automoción, poseen un mayor rango de exigencia en comparación con los necesarios para aplicaciones estacionarias.

Gracias a la importancia que posee el sector del transporte a nivel mundial, muy particularmente en los países desarrollados, los principales fabricantes de automóviles están logrando que, ante la necesidad de dar respuesta a los desafíos planteados, la industria del

automóvil actúe como fuerza impulsora en el desarrollo del almacenamiento de hidrógeno (H₂).

Existen diferentes formas de realizar el almacenamiento de este combustible, las cuales cumplen en mayor o menor medida, los requisitos necesarios establecidos, para poder llevar a cabo su aplicación. Actualmente, las metodologías para su almacenamiento pueden estar basadas en métodos tales como el almacenamiento del gas a elevadas presiones; almacenamiento en forma líquida, denominado almacenamiento criogénico; almacenamiento en aleaciones metálicas; almacenamiento en estado sólido; almacenamiento en carbón, ya sea carbón activado, grafito, lechos de carbón molecular o nano-fibras entre otros; almacenamiento en forma de compuestos químicos como el tolueno (C₆H₅CH₃) o el amoníaco (NH₃); almacenamiento en micro-esferas de vidrio y almacenamiento en zeolitas.

De todas estas operaciones, actualmente solo las tres primeras presentan la suficiente fiabilidad como para estar presentes en el mercado y poder ser empleadas con suficientes garantías. (32) El resto de posibilidades se encuentra aún en fases tempranas de investigación. A continuación se realiza una breve descripción sobre los métodos más empleados en los tanques de hidrógeno (H₂).

3.23.4.1.3.1.-Depósitos de alta presión.

Esta clase de tanques, son la forma más común a día de hoy de almacenar hidrógeno (H₂) en aplicaciones automovilísticas. Esto se debe a la simpleza de su estructura y de su mecanismo de carga/descarga. (33)

Su principio de funcionamiento está basado en un recipiente cilíndrico, el cual se encarga de almacenar hidrógeno (H₂) gas a elevadas presiones, que actualmente rondan el orden de los 70MPa, por lo que en dichas condiciones el gas posee una densidad equivalente a los 40,816g/l. En la siguiente tabla se muestran algunas de las presiones más comunes de almacenaje en alta presión, con sus respectivas densidades.

Tabla 22: Presiones comunes de almacenaje del H₂ a alta presión.

Presión en MPa.	Densidad en g/l.
70	40,816
35	24,03
20	16
1	0,9

Generalmente, estos depósitos poseen un espesor diez veces menor que su radio, por lo que se les considera depósitos de membrana y los esfuerzos asociados resultantes de su presión, son denominados como esfuerzos membranales. Este tipo de esfuerzos, asumidos como uniformes, son el promedio de fuerzas de tensión y compresión, los cuales actúan de forma tangente en la superficie de dichos contenedores. En los estudios para los modelos ideales de estos tanques, se asume que sus paredes no ofrecen resistencia a la flexión, pero sin

embargo en la realidad esto no es cierto, ya que sufren esta clase de esfuerzos, además de sufrir los anteriores esfuerzos membranales.

Hasta hace pocos años, se empleaban depósitos de acero, los cuales presentaban una importante fragilidad ante las altas presiones, por lo que su peso al utilizar este tipo de material, se volvía desproporcionado. Investigaciones recientes, por parte de las diferentes compañías automovilísticas, aconsejan emplear materiales compuestos, tales como polímeros, ya que de esta forma se reduce notablemente su peso y se aumenta su resistencia ante los esfuerzos membranales, haciendo de estos un elemento de importante seguridad.

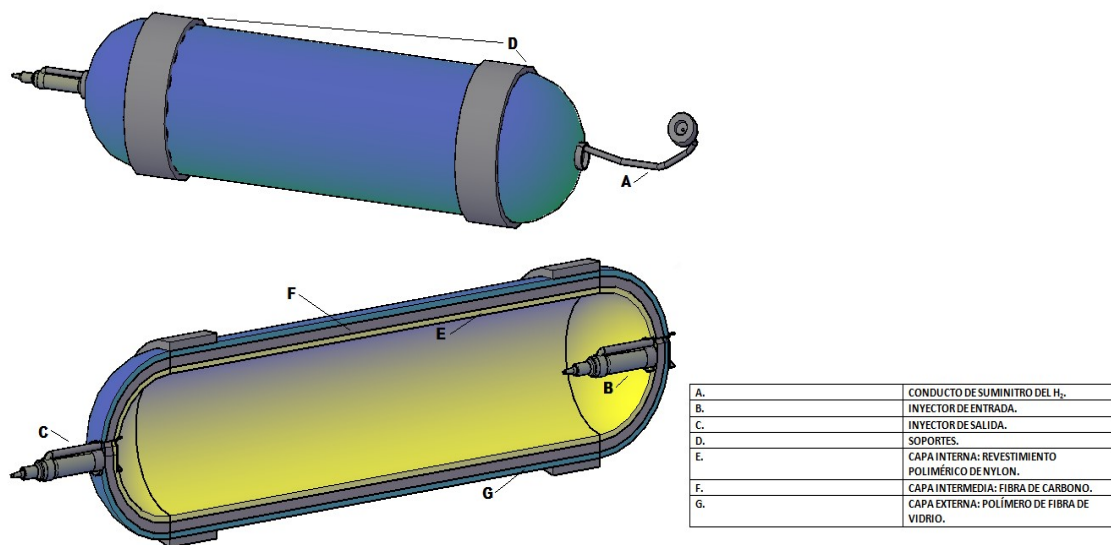


Figura 123: Depósito de hidrógeno (H₂) a altas presión, en Auto CAD.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Por ejemplo, la compañía Toyota, con su reciente modelo de automóvil Toyota Mirai, utiliza dos depósitos formados por tres capas de diferentes materiales, con una capacidad de 60 litros cada uno. Este modelo de depósito, proporciona una autonomía alrededor de los 500km, con un tiempo de repostaje de cinco minutos, lo que da lugar a un depósito de elevada competencia en el mercado. (10)

- La capa interna, la cual se encuentra en contacto con el combustible, se trata de un revestimiento polimérico de nylon, la cual se encarga fundamentalmente de prevenir las pérdidas y fugas de gas.
- La capa intermedia, proporciona una elevada solidez estructural dentro del sistema, por lo cual se encuentra formada por un plástico reforzado de fibra de carbono.
- La capa externa, se encarga de proporcionar una resistencia ante la abrasión del depósito. Para ello, se encuentra compuesta de un polímero reforzado con fibra de vidrio.

3.23.4.1.3.2.-Depósitos de almacenamiento criogénico.

Esta clase de almacenamiento de hidrógeno en forma líquida, empezó a utilizarse en los inicios de la carrera espacial, donde los tanques de combustible de ciertas lanzaderas como el Saturno V, al igual que los transbordadores espaciales, se llenaban con oxígeno (O₂) e hidrógeno (H₂) líquido. Estos elementos, eran mezclados en una cámara de combustión, donde reaccionaban de forma violenta, dando lugar a una reacción química que impulsaba los cohetes hacia el espacio.

Para poder almacenar el hidrógeno de forma líquida, se ha de mantenerlo a temperaturas criogénicas, ya que debido a su elevada volatilidad, no genera licuación hasta alcanzar los 20Kº, con una presión atmosférica. Debido a esto, los depósitos han de ser contruidos con sistemas consistentes de aislamiento térmico, en el interior de una estructura multicapa con vacío entre medias. De esta manera, se evita el calentamiento del hidrógeno por radiación o simplemente, por la convección del líquido.

Debido a la imposibilidad de aislar completamente los tanques a día de hoy, se generan una serie de pérdidas debidas a la evaporación del hidrógeno, por lo que al no utilizar un vehículo durante un largo periodo de tiempo, puede dar lugar a que el depósito quede completamente vacío. Debido a esta serie de inconvenientes, este tipo de depósitos no son apropiados para esta clase de vehículos por el momento. Sin embargo, a pesar de todas las desventajas, estos depósitos siguen siendo los de mayor densidad de almacenaje disponibles, por lo cual su desarrollo y la búsqueda de nuevos materiales para su construcción, pueden hacer de estos un importante elemento en el mundo del automóvil. (32)

3.23.4.1.3.3.-Depósitos de absorción en aleaciones.

Dentro de este tercer grupo depósitos de hidrógeno, el almacenaje es producido por la inclusión de las moléculas de hidrógeno entre la estructura de la aleación metálica. A día de hoy, las aleaciones metálicas, las cuales se están investigando para mejorar las propiedades de estos depósitos, alcanzan capacidades de almacenaje de hasta el 3% de su peso en hidrógeno (H₂). Una aleación, para que sea considerada como un posible sistema de almacenamiento de hidrógeno (H₂), debe cumplir ciertos requisitos técnicos, los cuales se exponen a continuación:

1. La aleación debe ser fácilmente formada y descompuesta.
2. La cinética de las reacciones de absorción y desorción, ha de tener una elevada velocidad para poder satisfacer los requerimientos de carga y descarga en el sistema.
3. La presión de equilibrio correspondiente a la temperatura de descomposición de la aleación, debe ser en todo momento compatible con los requerimientos de seguridad del sistema.
4. Debe contener óptimas condiciones de operación durante el mayor número posible de ciclos, tanto de carga como de descarga.

5. Finalmente, debe poseer la máxima tolerancia posible a las impurezas gaseosas que aporte el hidrógeno, ya que éstas dificultan las reacciones y disminuyen la vida útil del sistema.

Entre este tipo de aleaciones en desarrollo, destacan fundamentalmente las cuatro nombradas en la siguiente tabla.

Tabla 23: Aleaciones en depósitos de absorción de hidrógeno (H₂).

1. Aleación de titanio (Ti) con manganeso (Mn) y vanadio (V).
2. Aleación de titanio (Ti) con cromo (Cr) y vanadio (V).
3. Aleación de titanio (Ti), vanadio (V), cromo (Cr) y manganeso (Mn).
4. Aleaciones de titanio (Ti) y Cromo (Cr).

Actualmente, este valor de capacidad de almacenaje puede parecer diminuto, pero las capacidades de almacenaje de estas aleaciones están entre las investigaciones más prometedoras a día de hoy para almacenar a dicho elemento. Se esperan alcanzar densidades de almacenamiento de igual valor que en los depósitos criogénicos. Sus principales inconvenientes son la elevada necesidad de refrigeración de estos depósitos mientras se carga el hidrógeno (H₂); los esfuerzos, similares a los depósitos de alta presión, a los que se encuentran sometidos y la dificultad para liberar el hidrógeno (H₂) a bajas temperaturas. (7)

3.23.4.1.3.4.-Tanques de almacenamiento de hidrógeno (H₂) en estado sólido.

Dentro de los proyectos de investigación más prometedores en la actualidad, se encuentran los sistemas de almacenamiento del hidrógeno (H₂) en estado sólido (<14,01Kº). Recientemente, se ha postulado una tecnología que permite almacenar hidrógeno en estado sólido y liberarlo de forma rápida para su uso como combustible, lo que podría tener un importante peso en la aplicación automovilística.

De esta manera, éste compuesto se introduce en el interior de una matriz porosa, la cual es susceptible de ser calentada mediante la acción de un campo de microondas, para lograr así una elevada liberación del combustible, con la propiedad de ser de fácil control. Esta clase de materiales que componen dicha matriz, se encuentran fundamentalmente estructurados por erogeles de silicio (Si), debido a su baja densidad, su alta porosidad y a que son bastante ligeros. En el interior de esta serie de poros, se establecen depositados los correspondientes compuestos sólidos, los cuales posteriormente liberarán el hidrógeno (H₂).



Figura 124: Estructura de una matriz de aerogel de silicio (Si). A la derecha se observa la estructura vista desde un microscopio.

Fuente: www.aktarus-edilizia.com

El objeto de calentar la matriz porosa mediante un campo de microondas para poder liberar el hidrógeno, se debe a una mayor eficiencia en su calentamiento, superior a un 95%; a su elevada velocidad y a una mayor uniformidad en el resultado. Mediante esta tecnología, a pesar de que inicialmente fuese planteada en vehículos de celdas de combustible, podría ser aplicada en todo tipo de sistemas que requieran de energía con una baja penalización en peso y una alta autonomía energética.

Actualmente, estos prototipos encargados de almacenar el hidrógeno (H₂) en estado sólido, han sido estudiados y analizados con éxito a nivel teórico, en una escala de laboratorio por parte de un equipo de investigación de la Universidad de Valladolid (España) en 2015. La presente investigación denominada "Proyecto HIDROWAVE", fue dirigida por María José Cocero y Luis Miguel Sanz Moral *et al.* (34)

3.23.4.1.4.-Sistema de almacenamiento energético o baterías.

Este componente, posee la función de almacenar tanto la energía eléctrica generada por las pilas de combustible, como la generada mediante el frenado regenerativo del vehículo. Fundamentalmente, se emplean para hacer funcionar al sistema computacional y electrónico del sistema, junto con la aportación de corriente eléctrica al motor durante las elevadas demandas de energía, tales como en la aceleración, en la mejora de la eficiencia total del sistema y en el ahorro del combustible.

A su vez, poseen la función de estabilizar la tensión en el sistema eléctrico, ya que en determinadas ocasiones, la batería es capaz de reducir momentáneamente las altas tensiones ocurridas en el sistema eléctrico de los vehículos. A este fenómeno se le conoce con el nombre de potenciales transitorios, los cuales pueden dañar a otros componentes del sistema, si no estuvieran bajo la protección de una batería. Por este motivo, actualmente existen vehículos equipados con una segunda batería, en cuanto a esta función.

Se trata fundamentalmente de un conjunto de celdas, en cada una de las cuales tiene lugar una reacción química reversible, en la que se produce un intercambio de iones y electrones entre sus dos polos. Durante la descarga, se produce una corriente eléctrica, mientras que en la recarga, los iones y electrones vuelven a su situación original a partir de un aporte de energía externo. (35)

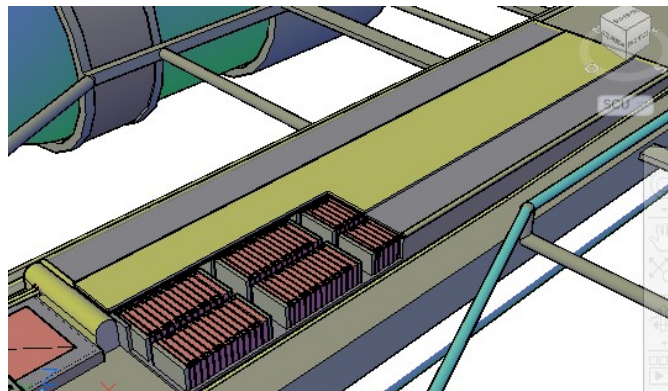


Figura 125: Sistema de almacenamiento energético de un vehículo de pila de hidrógeno (H₂), en Auto CAD.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Los dos elementos fundamentales, que determinan el comportamiento, rendimiento y la duración de una batería son, por un lado, los elementos químicos empleados para dar lugar a la reacción dentro de cada celda y, por otro lado, la electrónica que controla todo el proceso de descarga y recarga.

Las celdas de una batería, son su parte esencial, determinando su coste y rendimiento, de forma que la mayoría de las investigaciones se encuentran actualmente dirigidas a la mejora de este elemento. Cada celda consta de un cátodo, de un ánodo y de un electrolito capaz de que separar ambos electrodos, el cual constituye el medio neutral para la transferencia de carga dentro de la célula.

Hasta la actualidad, se pueden encontrar fundamentalmente tres tipo de baterías, las cuales han sido empleadas hasta el momento en éste tipo de aplicación. Recientemente, se está investigando sobre otros modelos de baterías, tales como las baterías de grafeno, las cuales tienden a ocupar la primera posición en estos próximos años. A continuación, se prosigue con el análisis de cada uno de estos tipos de baterías.

3.23.4.1.4.1.-Baterías de ion litio (Li).

Esta primera clase de baterías eléctricas, posee como principal característica el empleo de un electrolito líquido, en el cual se encuentra contenida una sal de iones de litio (Li), ya que de esta manera se consiguen los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible, la cual tiene lugar entre los electrodos. Estos electrodos, están compuestos por un lado de grafito, para dar lugar al ánodo, mientras que en el cátodo se identifica trifilina (LiFePO₄), óxido de cobalto u óxido de magnesio (MgO).

En su estructura, los iones de litio (Li) que se encuentran dentro del electrolito cambian del cátodo al ánodo espontáneamente, a través de dicho elemento, el cual permite su circulación, pero sin embargo no permite lo mismo con los electrones.

A la hora de la descarga, estos iones pueden desplazarse desde el cátodo hacia el ánodo, ya que ahora los electrones circulan por el respectivo circuito hasta equilibrar las cargas. Mediante esta circulación de electrones, se obtiene la corriente eléctrica. En el momento en el cual todos los iones estén situados en el ánodo, el flujo de electrones cesará, dando lugar a un agotamiento o descarga totalitaria en la batería. (22)

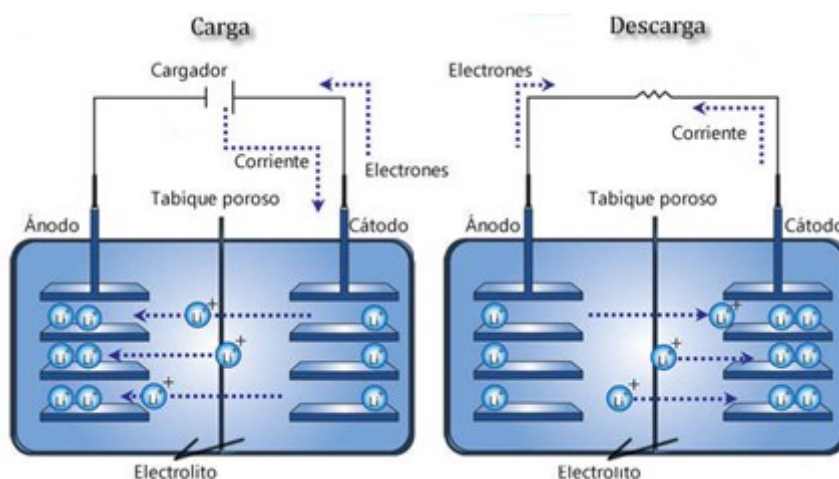


Figura 126: Esquema de descarga y carga de las baterías de ión litio.

Fuente: www.inventionary.com.ar

Por el contrario, el proceso de carga consiste en la aplicación de un flujo de electrones en sentido inverso al de la descarga, de manera que los iones ahora se desplacen desde el ánodo hasta el cátodo, recuperando su posición inicial.

Esta clase de baterías se encuentran formadas por una o más células, con un valor de tensión establecido en torno a los 3,6V en cada celda, por lo que se las puede encontrar conectadas tanto en serie, como en paralelo o incluso mediante una combinación de ambas.

Entre sus propiedades, destaca la ligereza por parte de sus componentes; su elevada capacidad de almacenar energía, rondando los 160Wh/kg; su alta resistencia a descargarse; su baja vulnerabilidad ante el efecto memoria, el cual es un fenómeno que reduce su capacidad frente a cargas incompletas; y su capacidad de trabajar con números elevados de ciclos regenerativos. De esta manera, se han podido diseñar baterías bastante ligeras y de menor tamaño, las cuales ofrecen altos rendimientos frente a la presente aplicación.

Por el contrario, debido a su alta degradación y sensibilidad ante elevadas temperaturas, éstas pueden sufrir procesos de inflamación e incluso explosión, por lo que en su diseño, se las debe de complementar con recubrimientos y elementos de seguridad. Este claro inconveniente, eleva su coste tanto a nivel económico como de fabricación, debido a esta serie de materiales empleados para su seguridad. En las dos siguientes tablas, se muestran sus principales propiedades, indicando sus ventajas e inconvenientes.

a).-Ventajas de las baterías de ión litio (Li):

1. *Elevada densidad de energía:* Acumulan mucha mayor carga por unidad de peso y volumen (160Wh/kg).
2. *Bajo peso:* A igualdad de carga almacenada, son menos pesadas y ocupan menos volumen que otras baterías convencionales.
3. *Alta tensión por célula:* Cada celda de la batería genera 3,6 V. Este potencial es aproximadamente equivalente al total generado por tres celdas de otras baterías, tales como las de metal níquel, las cuales generan 1,2V cada una.
4. *Carecen de efecto memoria:* Fenómeno el cual reduce su capacidad frente a cargas incompletas.
5. *Descarga lineal:* Durante toda la descarga, el potencial de la batería apenas varía, lo que evita la necesidad de circuitos reguladores. Esto es una ventaja, ya que hace muy fácil saber la carga almacenada por la batería.
6. *Baja tasa de auto-descarga:* En el caso de estas baterías, su valor de auto-descarga es inferior a un 6%, en comparación con otras baterías convencionales, en un mismo periodo de tiempo, ya que este tipo, tras seis meses en reposo, pueden retener aún el 80% de su carga.

b).-Inconvenientes en las baterías de ion litio (Li):

1. *Duración media:* Depende principalmente de la cantidad de carga que almacenen, independientemente de su uso. En general, poseen una vida media útil bastante corta, alrededor de los 3 años y alcanzando los 4 años si se almacenan con un 40% de su carga máxima.
2. *Soportan un número limitado de cargas:* Sus ciclo de carga a lo largo de su vida útil, se encuentran entre los 500 y 1500, por lo que hoy día ya empiezan a ser consideradas dentro de la categoría de baterías consumibles.
3. *Costosa fabricación:* Su fabricación posee un alto coste, a pesar de que los últimos años su precio ha disminuido, debido a su gran penetración en el mercado.
4. *Baja capacidad de trabajo en frío:* Ofrecen un bajo rendimiento ante bajas temperaturas, reduciendo su duración hasta en un 25%.

3.23.4.1.4.2.-Baterías de plomo (Pb) ácido.

Esta clase de sistemas de almacenamiento, llevan en el mundo de la automoción prácticamente desde sus inicios, ya que se necesitaron sistemas eléctricos para el arranque o la iluminación del vehículo, por lo que las baterías de plomo-ácido han estado ahí, almacenando electricidad de forma barata (40Wh/kg), pero a su vez, con un elevado peso.

Se encuentran compuestas por un depósito de ácido sulfúrico, en el que en su interior se disponen una serie de placas de plomo (Pb) de manera alterna. Posee un electrolito formado por agua destilada (H₂O) y ácido sulfúrico (H₂SO₄), contenido entre dos electrodos de plomo (Pb). Durante su proceso de carga, el sulfato de plomo (PbSO₄), es reducido a plomo metal, para formar óxido de plomo (PbO₂). Por el contrario, durante su descarga, los procesos anteriores son invertidos, ya que el óxido de plomo (PbO₂) es reducido a sulfato de plomo (PbSO₄), mientras que el plomo elemental es oxidado, dando lugar a sulfato de plomo (PbSO₄).

Esta clase de baterías, dejan de funcionar cuando el sulfato de plomo forma cristales de gran tamaño, por lo cual los procesos de carga y descarga presentan ciertos problemas en su funcionamiento. (22)

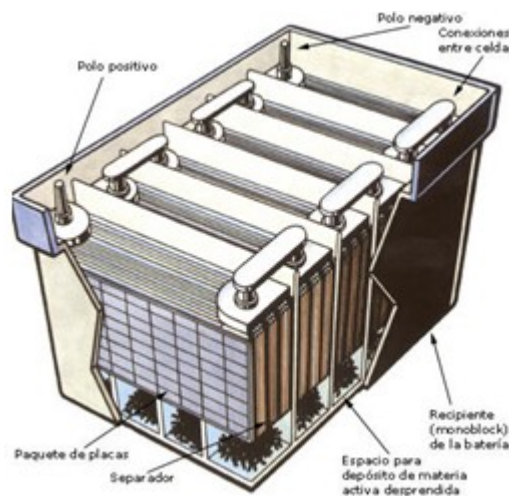


Figura 127: Batería de plomo ácido.

Fuente: www.mibgyyo.com

Suelen proporcionar una tensión de 6V, 12V u otro múltiplo de dos, ya que la tensión que suministra cada celda es de 2V, dando lugar a una media de entre 200 a 300 ciclos de vida. La razón fundamental de sus cortos periodos de vida, se debe a la corrosión del electrodo positivo y al agotamiento del material activo ante elevadas temperaturas. Estas características hacen de la batería de plomo (Pb) uno de los sistemas de almacenamiento energético de menor densidad de energía. A continuación se muestran una serie de ventajas e inconvenientes que ofrecen este tipo de baterías eléctricas.

a).- Ventajas de las baterías de plomo (Pb) ácido:

1. *Fabricación:* Se trata posiblemente de las baterías más fáciles de fabricar hoy en día, ofreciendo a su vez una alta asequibilidad.
2. *Fiabilidad:* Se trata de una tecnología bastante fiable y duradera, dentro de su rango de vida útil.
3. *Auto descarga:* Posee dentro del grupo de las baterías aplicadas al automóvil, uno de

los sistemas de auto descarga más bajos, por lo cual se puede encontrar un transporte en reposo funcional durante largo periodo de tiempo., sin que esta clase de baterías se auto descargue.

4. *Capacidad de descarga:* Poseen una capacidad para elevadas tasas de descarga.

b).-Inconvenientes dentro de las baterías de plomo (Pb) ácido:

1. *Densidad de energía:* Uno de los inconvenientes más importantes que poseen este tipo de baterías, es su baja densidad energética (40Wh/kg).
2. *Almacenamiento:* Presentan la imposibilidad de ser almacenados en un estado de baja carga.
3. *Vida útil:* Debido a sus bajos ciclos a lo largo de su vida útil, entre 200 y 300, presentan un tiempo de vida bastante corto, al igual que ocurre con el resto de baterías convencionales.
4. *Degradación ambiental:* Tanto sus contenidos en plomo (Pb) como en ácidos, presentan un importante impacto frente al medio ambiente.
5. *Duración de su carga:* Este tipo de baterías poseen la desventaja de emplear un periodo de entre 8 y 16 horas en ser cargadas por completo.

Debido a esta serie de inconvenientes, este tipo de baterías apenas se emplean a día de hoy en los automóviles con celdas de combustible, pero sin embargo estudios recientes, apuntan a fabricar baterías de plomo-ácido con una mayor densidad energética que otros tipos de baterías, a un menor coste de producción.

Como se ha explicado anteriormente, las baterías convencionales de plomo (Pb), se encuentran formadas por una serie de celdas de dos voltios cada unidad, encargadas de proporcionar la energía eléctrica. Estas celdas, son bastante ineficientes, ya que se necesita de una gran cantidad de plomo (Pb) para realizar las conducciones, generando un elevado peso.

Por el contrario, las investigaciones llevadas a cabo por la empresa Energy Power Systems, ofrecen una nueva batería constituida por capas, totalmente reciclable, capaz de eliminar ciertas conexiones innecesarias, aumentando de esta manera su densidad energética y por consiguiente, su eficiencia. (36) A su vez, se ha trabajado en el tamaño de las partículas, modificando la superficie de la batería para optimizar de esa manera la transmisión de electrones (e⁻).



Figura 128: Prototipo del modelo de batería de plomo-ácido de la empresa Energy Power Systems.

Fuente: www.motorpasionfuturo.com

Finalmente, se puede concluir con este prototipo de batería de plomo (Pb), aclarando que una posible combinación con las baterías de litio (Li), daría lugar a potentes modelos de baterías, permitiendo un extra de capacidad.

3.23.4.1.4.3.-Baterías de Metal Níquel (Ni).

Esta clase de baterías, han sido empleadas en diversos modelos, tales como el ya explicado Toyota Mirai, (10) por lo que han demostrado sobradamente su capacidad para responder con solidez dentro de los automóviles de celda de hidrógeno (H₂). Esto se debe básicamente a que presenta una importante potencia específica; un largo ciclo de vida y a su vez, no presentan problemas medioambientales.

Sin embargo, dan lugar a un elevado coste de producción, el cual tiende a incrementarse debido a los materiales empleados. Sus 80Wh/kg, las hace superiores a las de plomo ácido, pero las mantiene todavía a una cierta distancia del litio (Li), que no en vano, es el elemento más ligero de la tabla periódica, no siendo un gas a temperatura ambiente.



Figura 129: Batería de metal níquel (Ni).

Fuente: www.greenpacks.org

Para su funcionamiento, este tipo de sistema de almacenamiento, emplea un ánodo de oxihidróxido de níquel (NiOOH), junto con un cátodo formado por una aleación de hidruro

metálico, de forma que se logra una alta capacidad de carga. Cada celda de una batería de metal níquel, puede generar potenciales alrededor de los 1,2V. A su vez, esta clase de baterías no trata con metales que generen una importante degradación sobre el medio ambiente, ya que utilizan generalmente elementos como el titanio (Ti), el zirconio (Zr), el níquel (Ni), el cromo (Cr) y en algunos modelos el Lantano (La).

Otra de las principales propiedades que caracteriza a este tipo de baterías, es su despreciable efecto memoria. Sin embargo, para cada modelo, el fabricante ha de indicar en su ficha técnica si conviene o no, dejarlas cargadas, descargadas o semidescargadas tras su empleo. Generalmente, en la mayoría de los modelos se ha de realizar su almacenamiento con algo de carga. En cuanto a su exceso de carga, también puede ser un inconveniente, debido a que perjudica notablemente su vida útil. (22)

Por otro lado, también sufren un efecto de auto-descarga, perdiendo parte de su energía tras su inactividad, ya que no consiguen mantener toda la energía que contienen. Una batería de metal-níquel, posee una tasa de auto-descarga alrededor de un 30% en un periodo mensual, debido a la fuga de varios de sus átomos de hidrógeno (H₂). Si esta descarga es de elevada magnitud, la batería puede dañarse. Entre los problemas más comunes, se encuentra el de un separador afectado, siendo en este caso irreparable. A continuación se muestran las principales ventajas y desventajas de esta clase de baterías.

a).-Ventajas de las baterías de metal níquel (Ni):

1. Densidad energética: Presenta una elevada capacidad de almacenamiento de carga por unidad de peso y volumen, alcanzando los 80Wh/kg, a pesar de ser inferior a las de litio (Li).
2. Seguridad: Se trata de una clase de batería, la cual proporciona una alta seguridad en su manejo.
3. Bajo índice de degradación medioambiental: No emplea materiales que generen una importante degradación frente al medio ambiente.
4. Fácil manejo: Se trata del sistema de almacenamiento convencional, aplicado a la presente finalidad, más sencillo de emplear.
5. Efecto memoria casi despreciable: Apenas sufren dicho fenómeno, el cual reduce su capacidad frente a cargas incompletas.

b).- Inconvenientes de las baterías de metal níquel (Ni):

1. Efecto de auto-descarga: Poseen un alto grado de auto-descarga tras su inactividad, alcanzando un 30% de su capacidad en periodos mensuales.
2. Elevadas temperaturas: Esta clase de baterías, alcanzan elevadas temperaturas durante su carga y descarga, lo cual en ciertas ocasiones puede ser peligroso para el sistema, generando fallos en sus componentes.

3. Desestabilizada frente a fuertes descargas: A pesar de ser un tipo de batería bastante seguro, en ciertas ocasiones son incapaces de soportar fuertes descargas.
4. Elevado coste: Debido al uso de los materiales anteriormente nombrados, los cuales componen a este sistema de almacenamiento energético, su coste es incrementado.
5. Vida media: Al igual que los otros dos tipos de baterías convencionales, ofrecen un número limitado de cargas, entre los 500 y los 700 ciclos.
6. Elevados tiempos de recarga: Otro de los inconvenientes de esta clase de baterías frente a las anteriores, son su elevado tiempo de recargarse en su totalidad.

Finalmente, tras observar la serie de ventajas e inconvenientes mostradas por cada tipo de sistema de almacenamiento convencional para la presente funcionalidad, se puede verificar que las baterías de ión litio (Li) son las más adecuadas, a pesar de sus inconvenientes que aún a día de hoy se presentan.

Ésta es la razón por la cual son las más empleadas en los prototipos de coches de celda de hidrógeno (H₂). Incluso en compañías que han apostado por otra clase de baterías para sus modelos, tales como el Toyota Mirai, el cual emplea una de metal-níquel (Ni), tienen el objeto de introducir esta clase de elementos en sus diseños. (10) En la siguiente tabla, se muestran los tres principales datos técnicos de estos tres tipos de baterías convencionales. Los datos mostrados, son promedios de diferentes modelos que se comercializan actualmente.

Tabla 24: Datos técnicos de las baterías convencionales.

Modelo de batería.	Tensión por unidad de celda (V).	Densidad energética (Wh/kg).	Ciclos de vida.
Ión litio	3,6	160	500-1500
Plomo ácido	2	40	200-300
Metal níquel	1,2	80	500-700

Sin embargo, la gran proporción de inconvenientes que aún en la actualidad presentan esta serie de sistemas de almacenamiento, dan lugar a su continuo desarrollo e investigación por parte de diferentes grupos de índole científica. Este desarrollo, se basa en la búsqueda de nuevos elementos y modelos, que reduzcan su coste y optimicen sus parámetros técnicos, ya que se trata de uno de los principales puntos a investigar dentro del ámbito energético, el cual ofrece importantes expectativas para las próximas décadas. Entre las más recientes y esperanzadoras investigaciones dentro del ámbito del almacenamiento energético, destacan los siguientes tipos de baterías.

3.23.4.1.4.4.-Baterías de Litio (Li) y aire.

Recientemente, en la Universidad de Yale y en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, han desarrollado una membrana que posee una nano-estructura, capaz de

reducir la energía necesaria a la hora de recargar la batería, incrementando de esta manera su eficiencia. Durante su investigación, se han realizado sesenta ensayos de recargas, comprobando de esta manera que no se redujo su capacidad de almacenaje, presentando el doble de ciclos de vida que sus versiones anteriores.

Esta clase de baterías, ofrece una densidad energética de aproximadamente diez veces mayor que las convencionales de ión litio (Li), aumentando de esta manera su autonomía, junto con una reducción en su coste y en su tamaño. Cada celda de estas baterías es capaz de contener un potencial nominal de 2,91 V.

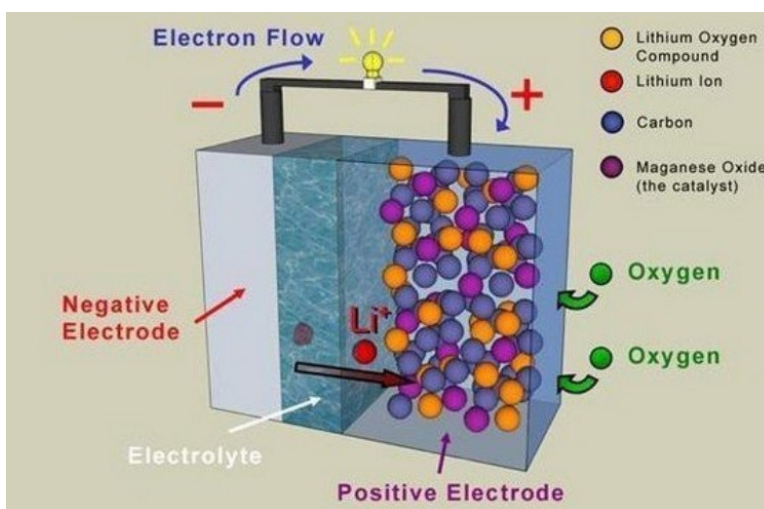


Figura 130: Esquema del funcionamiento de una batería de Litio-aire.

Fuente: www.motorpasionfuturo.com

Su funcionamiento, se basa en la generación de una corriente eléctrica a la hora de reaccionar los iones de litio (Li) con el oxígeno (O₂), dando lugar a óxido de litio (Li₂O). Para realizar su recarga, se debe invertir la presente reacción y así romper los enlaces entre los átomos de litio (Li) y los de oxígeno (O₂). El principal problema que presenta el óxido de litio (Li₂O), se debe a la formación de una capa sobre uno de los electrodos de la batería, cubriendo los catalizadores necesarios para liberar el oxígeno de manera eficiente.

La solución propuesta por los investigadores, consiste en cambiar la estructura de las baterías de litio-aire, añadiendo una membrana hecha de nano-fibras de polímero, recubiertas con el catalizador. Mediante esta técnica, se ha demostrado que no se forma óxido de litio (Li₂O) sobre las nano-fibras y por lo tanto, los catalizadores cumplen eficientemente su función.

3.23.4.1.4.5.-Baterías de aluminio (Al) y aire.

Se trata de un modelo de baterías, las cuales emplean pletinas de aluminio (Al) en el ánodo, mientras que el cátodo se utiliza plata, ya que de esta manera no se permite la entrada de dióxido de carbono (CO₂), siendo el oxígeno (O₂) del aire el que actúe. A su vez, como

electrolito, se propone una pequeña cantidad de agua (H₂O), a pesar de su efecto corrosivo sobre el aluminio y su incremento sobre la resistividad de sus celdas, debido a la liberación del hidrógeno (H₂) durante su descarga.



Figura 131: Batería de aluminio aire.

Fuente: www.motorpasionfuturo.com

Como posibles soluciones ante estos inconvenientes, se había ensayado con diferentes aluminios de alta pureza y distintas aleaciones químicas. Sin embargo, científicos de la empresa Fuji Pigment, han postulado encontrar la solución en el recubrimiento del ánodo con materiales cerámicos y carbonosos, para poder separarlo del electrolito y así evitar el proceso corrosivo.

De esta manera, cada celda sería capaz de suministrar 0,8V de tensión eléctrica y una elevada densidad de corriente, la cual rondaría los 8100Wh/kg. Como inconvenientes dentro de este nuevo modelo, se encuentra su necesidad de recarga de electrolito, es decir, del agua (H₂O), en periodos relativamente cortos, debido a que sus reacciones químicas lo van consumiendo.

Dicha investigación ha sido dirigida por el Doctor Ryohei Mori con la colaboración de la compañía Fuji Pigment en un estudio denominado "Addition of Ceramic Barriers to Aluminum (Al)-Air Batteries", el cual fue publicado en la revista científica "Journal of The Electrochemical Society" en el año 2015. (37)

3.23.4.1.4.6.-Baterías de sodio (Na) aire.

Se trata de un modelo de características similares a las ya tratadas baterías de litio (Li) aire, con la diferencia de no depender del litio (Li), por lo que sus costes de producción serían menores. Una celda básica o elemental de esta clase de baterías, consiste en un ánodo de sodio metálico (Na) y un cátodo de fibra de carbono, el cual funciona como difusor de gases. Entre ambos elementos, ha de colocar una lámina de fibra de vidrio que haga de separador. A su vez, como electrolito se propone emplear una solución de sodio (Ne), contenida en di-etilenglicol dimetil éter. De esta manera, se ha analizado teóricamente, alcanzar densidades energéticas de 1600Wh/kg.

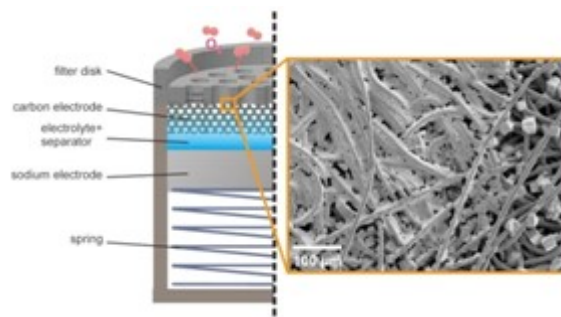


Figura 132: Esquema de una batería de sodio aire, junto con una imagen microscópica de su membrana.

Fuente: www.motorpasionfuturo.com

En la actualidad, varias compañías están apostando por la investigación sobre esta clase de baterías, ya que resultan muy prometedoras, tanto a nivel técnico como comercial. Entre dichos grupos de investigación, se encuentran investigadores de BASF y de la Universidad Justus-Liebig, en Giessen, junto con fabricantes de automóviles, tales como la empresa Toyota.

3.23.4.1.4.7.-Baterías de Zinc (Zn) y aire.

Esta clase de baterías, obtienen la energía a partir de la oxidación del zinc (Zn) con el oxígeno (O₂) contenido en el aire. Su principal inconveniente, se debe a su incapacidad de recargarse y cuando lo logran, requieren de electrodos de platino (Pt) o iridio (Ir), los cuales se degradan con facilidad.

Sin embargo, ante este problema, un grupo de investigadores de Stanford, han desarrollado un prototipo de batería de estas características, mediante el empleo de materiales más económicos para la fabricación de sus electrodos, los cuales proporcionan resultados muy prometedores. Estos materiales consisten en una combinación de nano-tubos con óxido de cobalto (CoO) en el ánodo, y nano-tubos compuestos por una aleación de hierro (Fe) y níquel (Ni) para el cátodo. (38)

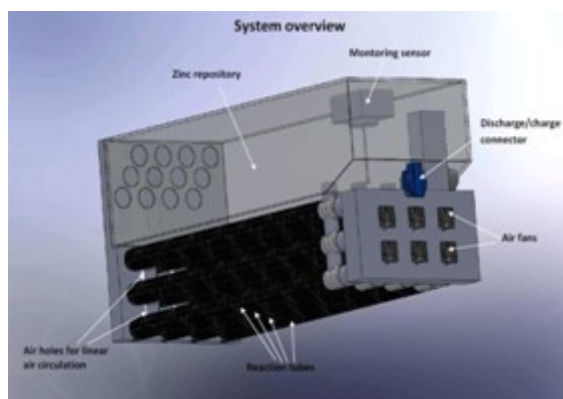


Figura 133: Esquema de una batería de zinc (Zn) aire.

Fuente: www.forococheselectricos.com

Además posee una configuración diferente, ya que la batería dispone de tres electrodos, en lugar de la configuración habitual de dos. Mediante esta manera se optimiza su comportamiento y se incrementa su volumen, alcanzando así una densidad energética, la cual duplica a las de las baterías convencionales de ión litio (Li).

Como se observa, es un modelo bastante prometedor, a pesar de que aún se encuentra en plena investigación y desarrollo.

Dicha investigación es llevada a cabo por Yanguang Li, Ming Gong, Yongye Liang entre otros investigadores, mediante un estudio denominado "Advanced zinc (Zn)-air batteries based on high performance hybrid electrocatalysts", el cual ha sido publicado en la revista científica Nature Communication en 2013.

3.23.4.1.4.8.-Baterías de sacarosa (C₁₂H₂₂O₁₁).

En la actualidad, existe un modelo de baterías en investigación por parte del Massachusetts Institute of Technology (MIT), el cual se centra en optimizar dos de los inconvenientes de mayor importancia que ofrecen las baterías convencionales de ión litio (Li), su alto grado de inflamabilidad y sus cortos ciclos de vida útil. Fundamentalmente, estos nuevos prototipos se basan en su termo-potencia, con la cual se permiten aprovechar las progresivas variaciones de temperatura, mediante el empleo de nano-tubos de carbono. De esta manera, se logra la generación de una corriente eléctrica.

El elemento clave de estos modelos, consiste en el empleo de sacarosa (C₁₂H₂₂O₁₁), la cual permite aumentar en 10.000 la intensidad de la corriente alcanzada en los primeros experimentos, siendo a su vez un elemento bastante seguro y sin riesgo de generar inflamabilidad. Otra ventaja la cual presenta esta sustancia, es su propiedad de no perder su capacidad energética a lo largo del tiempo.

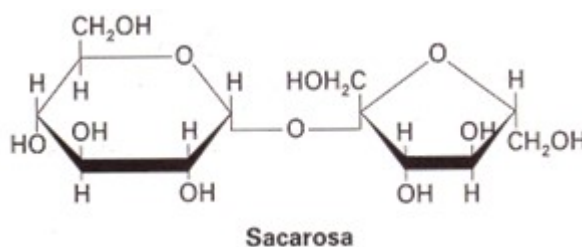


Figura 134: Estructura interna de la sacarosa.

Fuente: www.lookfordiagnosis.com

Futuras investigaciones dentro de este modelo, apuntan a la búsqueda de nuevos materiales que cumplan igual función que la sacarosa (C₁₂H₂₂O₁₁), pero ofreciendo una mayor eficiencia energética.

3.23.4.1.4.9.-Baterías de polímeros de grafeno.

Esta clase de baterías, se sitúan a día de hoy en la primera posición, dentro de los sistemas de almacenamiento más prometedores, ya que incluso se pueden encontrar varios prototipos a nivel comercial, los cuales presentan importantes propiedades.

Las baterías compuestas por polímeros de grafeno, ofrecen ciclos de vida útil, los cuales duplican a los 1500 ciclos alcanzados con las baterías de ión litio (Li) convencionales, alcanzando densidades energéticas alrededor de los 600Wh/kg. A su vez, el coste de producción de este tipo de baterías, es en torno a un 75% menor que para otros tipos dichos elementos, debido a la producción de su componente fundamente, el grafeno.



Figura 135: Batería de grafeno.

Fuente: www.masinox.es

Hasta día de hoy, se han realizado numerosos ensayos, introduciendo el grafeno en las baterías, logrando importantes resultados respecto a su tiempo de recarga. Un claro ejemplo ha sido el de un grupo de investigadores en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Gwangju, en Corea del Sur, logrando diseñar baterías de iguales características que las anteriormente explicadas en las de ión Litio (Li), pero cuyo tiempo de recarga se reduce a 16 segundos.

El objeto de futuros desarrollos, se encuentra centrado en la reducción de su volumen, el cual es demasiado elevado en proporción con su masa, logrando de esta forma mayores densidades energéticas. (39)

Como ya se ha mencionado, el elemento fundamental que caracteriza a esta clase de baterías, es el grafeno, un material descubierto en 2004 por Andre Geim y Konstantin Novoselov, dos premios Nobel (2010) de origen ruso de la Universidad de Manchester. Para analizar con más detalle esta clase de baterías, se estudiará a continuación el grafeno con sus respectivas propiedades.

3.23.4.1.4.9.1.-El grafeno.

Se trata de un material nano-métrico y bidimensional, consistente en una sola capa de átomos de carbono fuertemente cohesionados. (40) A su vez, estos átomos, se encuentran dispuestos en una superficie uniforme, con una ligera ondulación y una configuración hexagonal.

Consiste en el material de elevada dureza, resistente y elástico, junto con propiedades que le proporcionan una elevada conductividad tanto térmica como eléctrica. Su resistencia comparada con la de otros materiales como el acero, es decenas de veces superior, pero sin embargo, posee grosores del orden de entre uno y dos átomos de carbono. En la siguiente figura, se puede observar en la parte superior la estructura de una lámina de grafeno, mientras que en las imágenes inferiores, se representan de izquierda a derecha fullerenos, nanotubos y grafito, contruidos a partir del grafeno. (40)

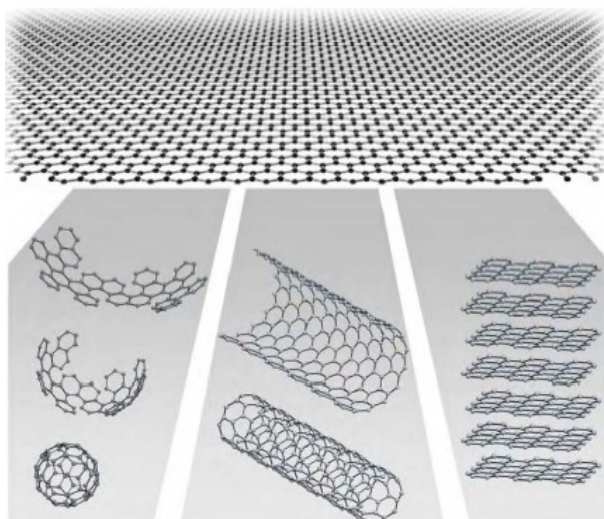


Figura 136: Lámina de grafeno, fullerenos, nanotubos y grafito (construidos a partir del grafeno).

Fuente: Obtenida a partir de la Tesis de Maestría en Física, "Transporte de carga y espín en grafeno", de Robert Mikhail Guzmán Arellano (2010).

En cuanto a su color, es prácticamente transparente, con una elevada densidad que ni el helio (He) es incapaz de atravesarlo. Además, ofrece otra gran variedad de cualidades, tales como su capacidad de movilidad de electrones, propiedad que ofrece su aplicación en el campo de los nano-dispositivos. Su espectro de posibilidades se su aplicación es de tan elevada magnitud y versatilidad, que promete con ello sustituir a elementos de gran interés en la actualidad, como pueden ser el litio (Li) o el silicio (Si). En la siguiente tabla, se muestran las propiedades de este material, las cuales poseen un especial interés para el campo del almacenamiento energético en el automóvil. (39)

Tabla 25: Propiedades del grafeno.

1. Elevada conductividad térmica y eléctrica.
2. Elevada elasticidad y dureza.
3. Importantes cualidades como semiconductor.
4. Elevada resistencia mecánica.
5. Elevada oposición ante la radiación ionizante.
6. Elevado grado de ligereza y flexibilidad.
7. Menor sensibilidad ante el efecto Joule, por lo cual adquiere menores temperaturas a la hora de conducir a los electrones (e ⁻).
8. Menor consumo de electricidad frente a otros materiales convencionales como el silicio (Si).
9. Elevada capacidad de reacción química ante otras sustancias para dar lugar a numerosos compuestos, lo que dota a este material de elevado potencial y desarrollo.

3.23.4.1.5.-Unidad electrónica de control.

Este elemento computacional, funciona como el cerebro del sistema, ya que es el encargado de controlar su funcionamiento. Entre su amplio campo de funciones dentro del automóvil, permite medir y controlar tanto las presiones, como las temperaturas del hidrógeno (H₂) contenido en el interior de los depósitos; permitir la entrada del aire (O₂) a la pila de combustible; controlar y regular la entrada de hidrógeno (H₂) en las celdas de combustible; regular la tensión y la corriente eléctrica generada en la pila; mantener el control sobre el motor eléctrico; regular los procesos de carga y descarga en los sistemas de almacenamiento energético; detectar los picos de demanda requeridos en el motor eléctrico, para a continuación combinar tanto la energía generada por la pila como la energía almacenada en las baterías; detectar fallos generados en el sistema para mantener la seguridad de éste; y controlar el resto de componentes del vehículo, tales como el sistema de alumbrado e intermitencia o los limpiaparabrisas, entre otros. A continuación, se muestra un ejemplo de un inyector de hidrógeno (H₂), el cual es controlado mediante la unidad electrónica de control.

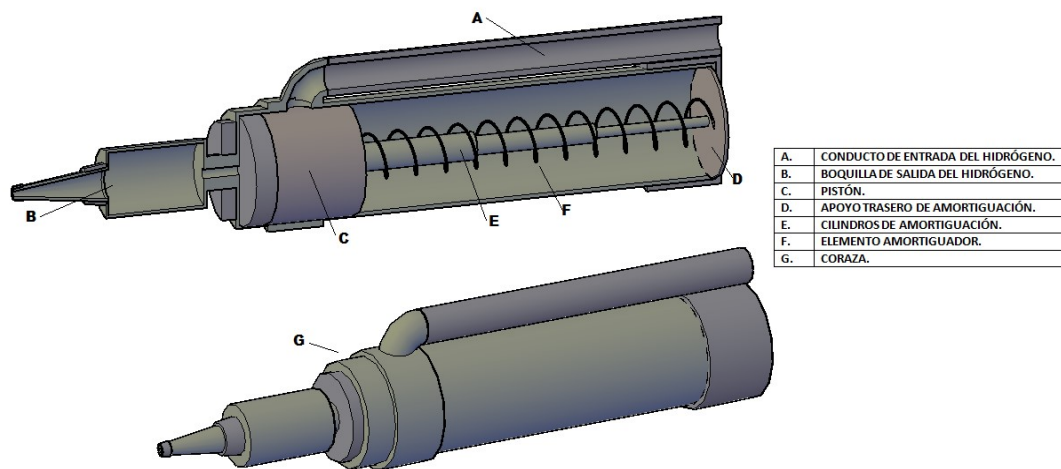


Figura 137: Inyector de compresión controlado de manera electrónica para el paso del hidrógeno (H₂) hacia los depósitos de alta presión.

Fuente: Este modelo ha sido realizado por el autor del presente estudio.

3.23.4.1.6.-Sistema de conductos para gases.

Este conjunto de tuberías, es el encargado de comunicar a la pila de hidrógeno (H₂) con los depósitos del combustible y de realizar la conducción tanto de dicho gas, como del oxidante (O₂) y de los productos generados, en este caso el agua (H₂O).

En los conductos por los cuales circula el oxígeno (O₂) proveniente del exterior y en los que circula el agua (H₂O) generada, se pueden emplear los materiales convencionales al igual que en los automóviles que basan su funcionamiento en combustibles convencionales, pudiendo ser polímeros o aleaciones metálicas.

Sin embargo, en tubos que comunican a la pila de combustible con los depósitos de hidrógeno (H₂), debido a la circulación de este gas, se deben emplear materiales que proporcionen una importante seguridad y así evitar las posibles fugas de este gas. Entre ellos, destaca el empleo de conductos de tres capas al igual que en los depósitos anteriormente explicados. (10)

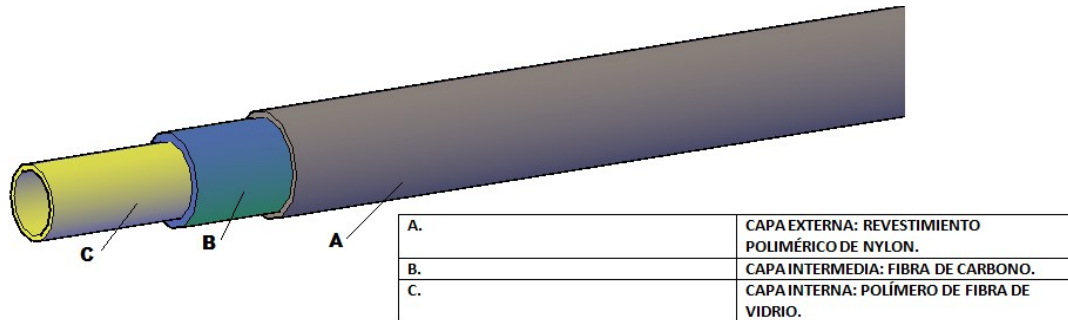


Figura 138: Conducto de hidrógeno (H₂).

Fuente: Este modelo ha sido realizado por el autor del presente estudio.

- La capa interna, la cual se encuentra en contacto con el combustible, se trata de un revestimiento polimérico de nylon, la cual se encarga fundamentalmente de prevenir las pérdidas y fugas de gas.
- La capa intermedia, proporciona una elevada solidez estructural dentro del sistema, por lo cual se encuentra formada por un plástico reforzado de fibra de carbono.
- La capa externa, se encarga de proporcionar una resistencia ante la abrasión del depósito. Para ello, se encuentra compuesta de un polímero reforzado con fibra de vidrio.

3.23.4.1.7.-Sistema de frenado regenerativo.

Son dispositivos de fricción instalados en las ruedas, los cuales son capaces de recuperar y generar energía eléctrica tras las frenadas, desaceleraciones y aceleraciones, la cual es almacenada en las baterías. Los dispositivos regeneradores se encuentran situados junto a los frenos hidráulicos, siendo capaces de proporcionar hacia el sistema de baterías, una potencia que en algunos modelos alcanza desde los 15 a los 20kW.

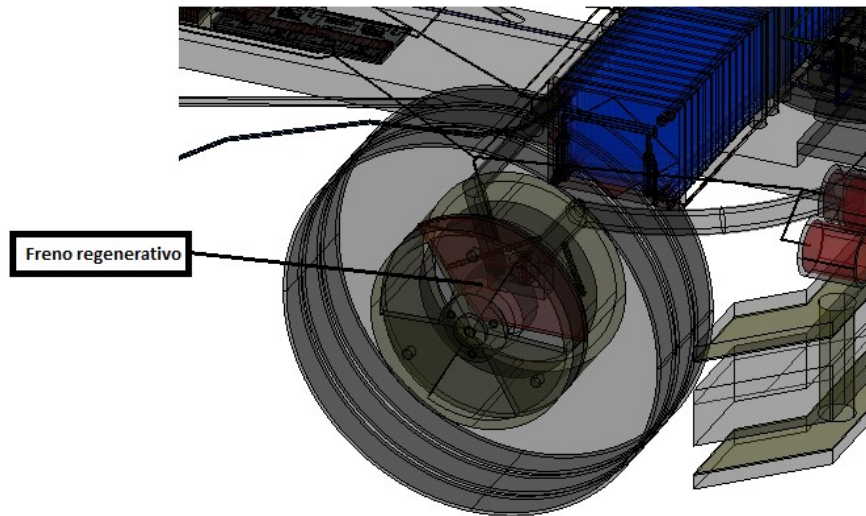


Figura 139: Sistema de frenado regenerativo mediante fricción, modelado en Auto CAD 3D.

Fuente: Esta figura ha sido modelada por el autor del presente estudio.

3.23.5.-Vehículos que basan su funcionamiento en motores de combustión interna, empleando hidrógeno (H₂) como combustible.

Esta clase de motores, posee una configuración semejante a cualquier otro tipo de motor de combustión interna de cuatro tiempos, los cuales ya han sido analizados en apartados anteriores de este estudio. Por lo tanto, a la hora de diseñar un motor de dichas características que basa su funcionamiento en el hidrógeno (H₂) como combustible, se ha partir de los conocimientos adquiridos sobre los motores convencionales de combustión interna, junto con una serie de modificaciones debidas a las propiedades de dicho combustible. (41)

Son varias compañías de automóviles, las cuales han apostado por el empleo de dicho combustible en sus motores de combustión interna, debido a las propiedades que ofrece el hidrógeno (H₂). Entre diversos fabricantes, destaca la compañía alemana BMW, promotora de esta clase de motores con su modelo BMW-750hL.

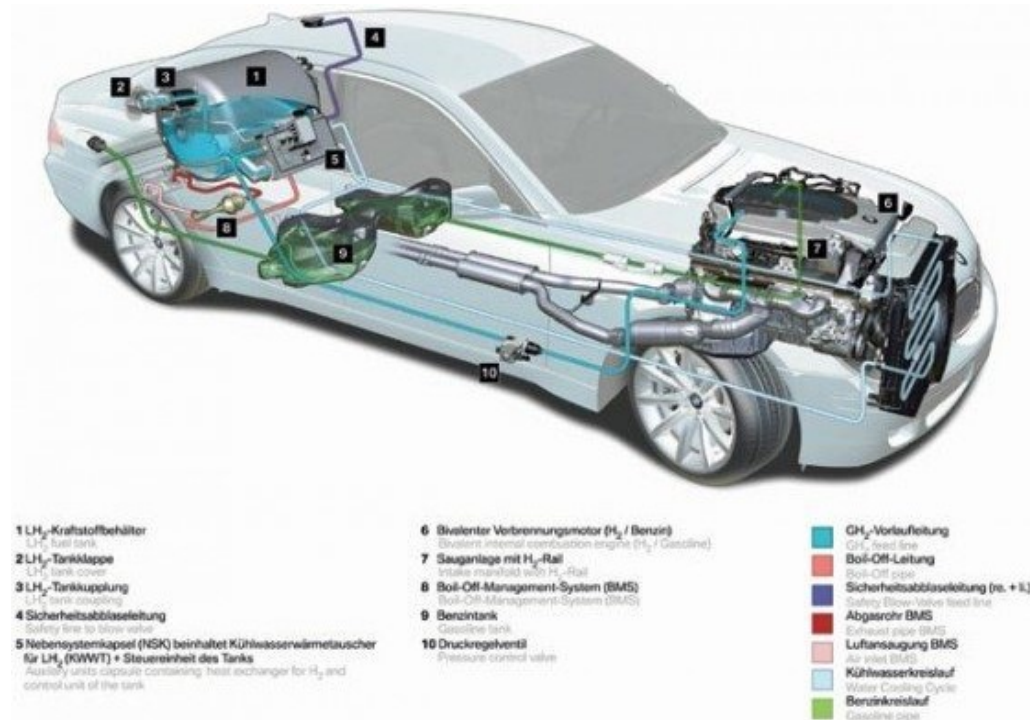


Figura 140: BMW serie 700 con un motor de combustión interna de hidrógeno (H₂).

Fuente: www.erenovable.com

A continuación, se exponen el conjunto de componentes a modificar sobre un motor de combustión interna convencional, para que pueda emplear al hidrógeno (H₂) como combustible.

3.23.5.1.-Elementos que lo componen.

Fundamentalmente para permitir el funcionamiento de un motor de combustión interna mediante el hidrógeno (H₂) como combustible, se han de diseñar los siguientes ocho componentes con las siguientes propiedades.

3.23.5.1.1.-Mecanismo de ignición.

En un primer lugar, producto del bajo límite en la energía de ignición del hidrógeno (H₂), es sencillo lograr su encendido, por lo que se puede aprovechar el mecanismo de ignición de los motores de combustión interna de gasolina, ya explicados con anterioridad.

Sin embargo, para bajas relaciones entre el comburente y el combustible, la velocidad de la llama se reduce considerablemente, siendo preferible emplear un sistema de doble bujía.

Los sistemas de ignición basados en el mecanismo de chispa, no deben de ser utilizados en los motores de hidrógeno (H₂), por lo cual, para este sistema, existe una bobina

de ignición en cada par de cilindros. A la hora de activar la bobina, se hace saltar la chispa en las bujías de dos cilindros al mismo tiempo, pero debido a que únicamente uno de los dos se encuentra en fase de compresión, solamente se da lugar a una única explosión. Por el contrario la segunda chispa generada para el otro cilindro se desprecia. Esta chispa residual, puede ser empleada como una importante fuente de potencial en el pre-encendido del combustible.

Las bujías empleadas en los motores de hidrógeno (H₂), deben encontrarse clasificadas como frías, es decir, que transfieran el calor desde el extremo de la misma hacia la cabeza del pistón, de manera rápida y cuyos extremos no sean de platino (Pt). De esta forma, la posibilidad de que la punta de la bujía produzca la ignición entre la mezcla de combustible y comburente, queda reducida de manera potencial.

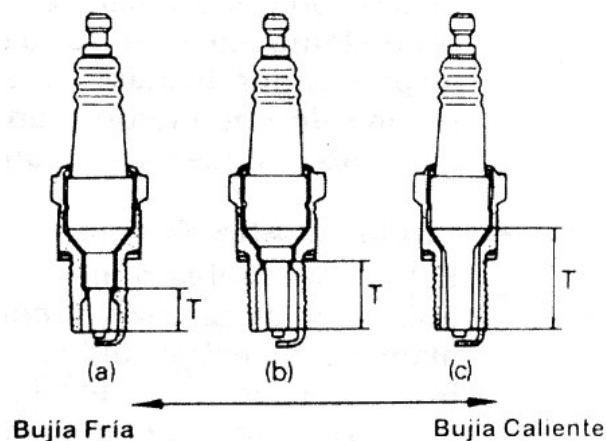


Figura 141: Perfiles de diferenciación entre las bujías frías y calientes, en los cuales T, se trata de la longitud del aislador.

Fuente: www.automotriz.net

El hecho de no emplear bujías platino (Pt), se debe a que este actúa como catalizador durante el encendido. A su vez, la parte del hueco de la bujía, en su extremo donde la chispa es generada, ha de rebajarse en masa con el objeto de mejorar la eficiencia eléctrica, mientras que para optimizar el sistema, se utilizan bobinas separadas para cada bujía. (41)

3.23.5.1.2.-Control sobre el aceite del motor.

En un segundo lugar, se han de reducir drásticamente las emisiones contaminantes. Por este motivo, se pretende reducir el consumo de aceite, el cual finaliza quemándose en la cámara de combustión, produciendo sus consiguientes emisiones degradantes.

Para proseguir a su reducción hasta niveles prácticamente nulos, se ha de tener especial atención en el cuidado de las tolerancias en el cilindrado y en su rugosidad, empleando aceites, al poder ser minerales, tales como los mencionados en el apartado de los motores de ciclo rotativo. A su vez, se han de reemplazar los pistones, por otros compuestos

de aleaciones de aluminio y silicio hipereutéticas, con la finalidad de disminuir la expansión térmica. (41)

3.23.5.1.3.-Sistema de culata y refrigeración.

En esta clase de motores, ha de emplearse una culata de especial estructura, ya que el hecho de utilizar el hidrógeno (H₂) como combustible, obliga a tener en cuenta una serie de pautas, tales como su baja energía de ignición o su amplio margen de inflamabilidad. Esta es la razón por la cual, se deben evitar zonas de excesivas temperaturas en la cámara de combustión.

Para su objetivo, se debe incrementar el flujo de refrigerante en las proximidades de la bujía y de las válvulas de escape, y así evitar la generación de la pre-ignición del combustible. También se ha de prestar especial atención a la temperatura de las válvulas de escape, pudiendo usarse sodio (Na) en su interior, junto con una mecanización sobre la cámara de combustión y un aumento sobre la relación de compresión. (41)

Otra importante recomendación por parte de los fabricantes, es el uso de la estelita, una aleación de cobalto (Co) y cromo (Cr) en las válvulas, ya que este material incrementa su resistencia superficial ante su desgaste.

3.23.5.1.4.-Estructura del motor.

Producto del aumento en la compresión, se ha de realizar una serie de importantes cambios estructurales, con el objetivo de que los motores puedan funcionar con hidrógeno (H₂). Básicamente, consiste en realizar un refuerzo de todos sus elementos de transmisión de fuerza, tales como los bulones de los pistones, el cigüeñal y las bielas. A su vez, en ciertos modelos, es necesario modificar la posición de sus segmentos, debido a estas sobrepresiones.



Figura 142: Motor de combustión interna de BMW, que emplea hidrógeno (H₂) como combustible.

Fuente: www.marcadecoche.com

3.23.5.1.5.-Mecanismo de suministro del combustible.

A la hora de suministrar el hidrógeno (H₂) al interior del motor, existen principalmente tres procedimientos empleados en los prototipos a día de hoy, los cuales quedan recogidos en la siguiente tabla con sus propiedades. (41)

a).-Carburación.

Se trata del método más sencillo de entregar el hidrógeno (H₂) al motor, mediante el empleo de un carburador. Otra ventaja que supone emplear la carburación en un motor de combustión interna de hidrógeno (H₂), es el no requerimiento de una elevada presión para el suministro del combustible.

Sin embargo, este mecanismo resulta bastante susceptible a una combustión irregular, generando problemas en el pre-encendido y en el retroceso de la llama. A su vez, una mayor cantidad de mezcla entre el aire y el hidrógeno dentro del conducto de admisión, incrementa los efectos de pre-encendido.

b).-Inyección por conducto (PIF).

Mediante el sistema de suministro del hidrógeno (H₂) por conducto, se inyecta dicho combustible directamente dentro del conducto de admisión en cada orificio de admisión, en lugar de introducir el hidrógeno (H₂) en un único punto. Generalmente, el combustible ha de inyectarse en el interior del conducto, tras producirse la carrera de admisión.

Mediante este mecanismo, se reducen las posibilidades de que se produzca el pre-encendido del hidrógeno (H₂). Debido a esto, el aire que ha entrado en la cámara de combustión enfría el recinto y por consiguiente, todos aquellos puntos calientes que pudieran comportarse como fuente de ignición desaparecen.

En este sistema, el aire es suministrado al motor de manera separada, durante el inicio de la carrera de admisión, para así poder diluir los gases residuales y refrescar cualquier punto caliente que haya podido quedar. Puesto que en el conducto de admisión existe una menor cantidad de gases, cualquier pre-encendido que se produzca será de menor gravedad.

La presión durante el suministro a la entrada del orificio de admisión, tiende a ser mayor que en un sistema de carburación o en uno de inyección central, mientras que es de menor valor que en los sistemas de inyección directa.

El sistema de inyección a volumen constante, emplea un dispositivo mecánico accionado por levas, para así elegir el instante en el cual se debe inyectar hidrógeno (H₂) en cada cilindro.

Para el cálculo en la cantidad de hidrógeno (H₂) que debe introducirse en cada cilindro, se emplea un sistema de inyección electrónica de combustible, el cual emplea inyectores electrónicos en cada cilindro. A su vez, este sistema realiza una sincronización constante y mantiene a una presión variable a los conductos por los cuales circula el hidrógeno (H₂).

c).-Inyección directa.

Se trata del mecanismo más empleado a día de hoy por los automóviles que trabajan con esta tecnología, ya que se introduce el hidrógeno (H₂) durante la carrera de compresión, dando lugar a un sistema bastante sofisticado. Durante este proceso, la válvula de inyección se encuentra cerrada mientras se inyecta el comburente, evitando por completo el problema de pre-encendido, por lo cual, no se dará lugar al retroceso de la llama hacia el conducto de admisión.

A pesar de que de esta manera se soluciona el pre-encendido en el conducto de admisión, éste no es totalmente reducido en la cámara de combustión. A su vez, el reducido tiempo de mezcla entre el comburente y el combustible, da lugar a que la mezcla no sea del todo homogénea. Dicha falta de homogeneidad, puede generar mayores emisiones de NOx que en los sistemas anteriores.

La hora de realizar la inyección del combustible, éste puede ser introducido a temperatura ambiente o bien de manera criogenizada. Mediante el segundo método, al introducirse el hidrógeno (H₂) a temperaturas extremadamente bajas en la cámara de combustión, se incrementa el llenado del cilindro, por lo cual, la potencia y el rendimiento del motor se eleva.

En algunos tipos de motores, los cuales pueden funcionar tanto con gasolina como con hidrógeno (H₂), se ha de instalar un sistema de inyección para cada tipo de combustible.

Como se puede observar, analizando y comparando las propiedades de los tres anteriores sistemas de inyección, con sus respectivas ventajas y desventajas, se puede concluir comentando que el mecanismo de inyección directa es el de mayor conveniencia frente a los otros dos sistemas. Dicha razón ha dado lugar a que las compañías de automóviles, las cuales han invertido en esta clase de motores, hayan apostado por este tercer sistema de inyección del hidrógeno (H₂).

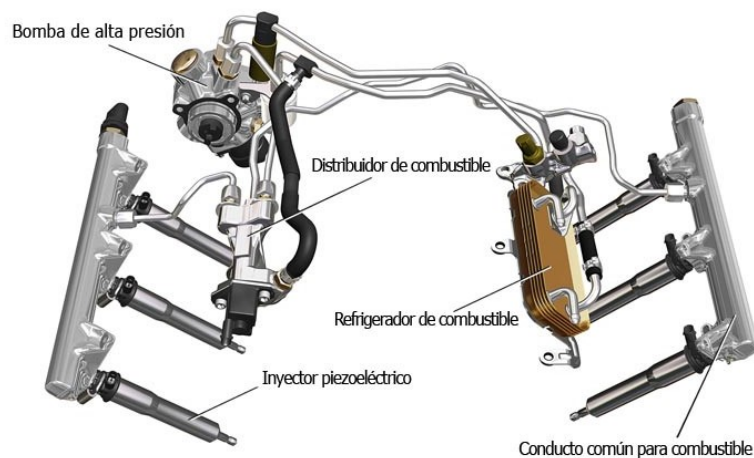


Figura 143: Sistema de inyección directa del combustible.

Fuente: www.erenovable.com

3.23.5.1.6.-Ventilación sobre el cárter del motor.

Este proceso, resulta ser de mayor importancia en esta clase de motores, que en los que emplean como combustible a la gasolina, debido a que el hidrógeno (H_2) posee un límite de ignición más bajo que ésta. Por lo tanto, el hidrógeno (H_2) que no se haya quemado y que pueda entrar en el cárter del motor, posee una alta probabilidad de incendiarse. Para poder prevenir dicha acumulación de hidrógeno (H_2), se ha de realizar una correcta ventilación.

Los resultados generados por una ignición en el interior del cárter, pueden dar como resultado un simple ruido, o por el contrario incendiar el motor. Lo que realmente ocurre cuando el hidrógeno (H_2) es quemado en el interior del cárter, se trata de un incremento repentino en el valor de la presión, por lo que para disminuir dicha presión, se ha de instalar una válvula de descarga.

A su vez, los gases de escape también se pueden filtrarse a través de los aros del pistón, rumbo hacia el cárter del motor. Dado a que la única emisión generada tras la combustión del hidrógeno (H_2) en un motor, es el vapor de agua, éste puede condensarse en el cárter si no se diseña un sistema de ventilación adecuado. Además, si se mezcla el agua condensada con el aceite del motor, se reduce su capacidad de lubricación, dando lugar a un elevado desgaste en el motor, junto con la formación de hidrocarburos. (41)

3.23.5.1.7.-Sistema de escape.

Tras la combustión del hidrógeno (H_2) en el interior del motor, se genera una gran cantidad de agua (H_2O), el cual debe circular a través de un adecuado sistema de escape para a continuación ser expulsado a la salida del sistema.

Por lo tanto, se debe prestar especial atención a los materiales que componen dicho sistema, ya que deben ser resistentes ante la corrosión. A su vez, este sistema deberá estar diseñado de tal manera que el agua generada no pueda retenerse en ningún lugar a lo largo de su recorrido hacia el exterior. Si se diera el caso de quedar estancada mientras se circula en algún lugar de bajas temperaturas, podría generar gelificación, junto con los inconvenientes que ello conlleva.

Para realizar su correcto diseño, se debe utilizar un modelo el cual contenga una pendiente descendente desde el motor, hasta el punto de salida, para así evitar que el agua quede estancada en el silenciador. Los materiales más empleados por los fabricantes a día de hoy tanto en estos conductos, como en el silenciador, son los aceros inoxidables.

Por otro lado, mediante el empleo de un turbocompresor instalado en el sistema de escape, se obtiene la posibilidad de inyectar una mayor cantidad de aire en el interior del motor. Sin embargo, al utilizar este elemento, se debe de tener en cuenta que además de inyectar mayor cantidad de aire en el interior del cilindro, éste se introduce a una mayor temperatura. Para contrarrestar dicho efecto, se puede instalar un refrigerador de aire en admisión, de manera que el aire es introducido a unos 60 °C. (41)

A su vez, la incorporación de un turbocompresor, añade el problema de incrementar la temperatura en el aceite del motor, ya que es éste quien refrigera al turbocompresor. Una de las formas más comunes de dar solución a este problema, se trata de instalar un radiador de aceite.

3.23.5.1.8.-Aceite lubricante.

Como ya se ha explicado anteriormente, debido a la gran cantidad de agua generada por el motor al consumir hidrógeno (H₂), el aceite puede quedar pegado a las paredes de los cilindros al mezclarse con el agua, anulando así su función como lubricante.

También se han de reducir las emisiones de hidrocarburos que pueden llegar a formarse debido a la reacción del hidrógeno (H₂) con el aceite del motor, tras haberse descompuesto éste último. Por lo cual, se aconseja el empleo de lubricantes sintéticos de baja volatilidad a elevadas temperaturas.

3.23.5.2.-Reacciones ocurridas dentro de un motor de combustión interna basando su funcionamiento en el empleo de hidrógeno (H₂) como combustible.

De manera ideal, tras la combustión del hidrógeno (H₂) con oxígeno (O), se genera agua (H₂O) como producto resultante. Sin embargo, en la realidad, dentro de esta clase de motores, el aire obtenido de la atmósfera no contiene únicamente oxígeno, ya que se encuentra compuesto a su vez, por otra serie de gases, entre los que destaca el nitrógeno, debido a su alta concentración. A continuación, en la siguiente tabla, se muestran los gases que normalmente componen el aire, junto con sus respectivas concentraciones. (42)

Tabla 26: Gasas componentes del aire ambiente.

Componente	Concentración en volumen (%)
Nitrógeno (N ₂)	78,03
Oxígeno (O ₂)	20,99
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,03
Argón (Ar)	0,94
Neón (Ne)	0,00123
Helio (He)	0,0004
Criptón (Kr)	0,00005
Xenón (Xe)	0,000006
Hidrógeno (H ₂)	0,01
Metano (CH ₄)	0,0002
Óxido nitroso (N ₂ O)	0,00005
Vapor de agua (H ₂ O)	Depende del lugar.
Ozono (O ₃)	Depende del lugar.

Debido a esta compleja y variable composición en el aire, el hidrógeno (H₂), además de reaccionar con el oxígeno, puede a su vez reaccionar con alguno de los otros gases,

principalmente con el nitrógeno (N₂). (41) Es entonces, cuando se generan los óxidos de nitrógeno (NO_x), producto de las elevadas temperaturas en el interior de la cámara de combustión durante la misma. Estas altas temperaturas, dan lugar a que una parte del nitrógeno (N₂) se combine con el oxígeno (O₂). La cantidad de óxidos de nitrógeno generada, es muy variable, ya que puede ser prácticamente nula, o por el contrario tratarse de cantidades importantes. Su generación depende de factores como pueden ser la relación entre el aire y el combustible; la relación de compresión; la velocidad del motor; la regulación en el encendido o el sistema de refrigeración empleado.

- **Modelo ideal** $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
- **Modelo real** $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{NO}_x$

Junto con los óxidos de nitrógeno, pueden existir restos de monóxido de carbono (CO) o de dióxido de carbono (CO₂) en los gases de escape, debido al filtrado del aceite dentro de la cámara de combustión. A continuación, se va a proceder a realizar un análisis estequiométrico sobre los componentes que intervienen en la reacción de combustión producida.

Tabla 27: Cálculo de las relaciones estequiométricas.

Partiendo de la reacción ideal en dicha combustión, se obtiene los moles de hidrógeno (H₂) y de oxígeno (O₂) que tienen lugar. • $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ Moles de H₂: 2 moles. Moles de O₂: 1 mol.
Una vez conocidos los moles de oxígeno (O₂), se pueden calcular los moles de nitrógeno (N₂) generados, a partir de la concentración de dichos gases en el aire. • Ecuación 17: $\text{Moles de N}_2 = (\text{moles de O}_2) * (\text{Concentración de N}_2 / \text{Concentración de O}_2) = 1 * (78,03 / 20,99) = 3,717 \text{ moles de N}_2.$
Seguido, ya se pueden conocer los moles de aire, mediante la suma de los moles de oxígeno (O₂) y los de nitrógeno (N₂). • Ecuación 18: $\text{Moles de aire} = \text{moles de N}_2 + \text{moles de O}_2 = 3,717 + 1 = 4,717 \text{ moles de aire.}$
A continuación, se procede al cálculo de las masas de cada componente, ahora que son conocidos los moles. • Ecuación 19: Masa de O₂ = 1 mol de O₂ * (16 + 16) g/mol O₂ = 32g de O₂ • Ecuación 20: Masa de N₂ = 3,717 moles de N₂ * (14 + 14) g/mol N₂ = 104,076g de N₂ • Ecuación 21: Masa de H₂ = 2 moles de H₂ * (1+1) g/mol H₂ = 4g de H₂
Por lo tanto, la masa de aire, es la suma de las masas de nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂). • Ecuación 22: Masa de aire = 104,076 + 32 = 136,076g de aire.

Finalmente, ya es posible calcular las relaciones estequiométricas en masa y en volumen entre el aire y el combustible.

- Relación en masa = $136,076/4 = 34,01/1$
- Relación en volumen = $4,717/2 = 2,35/1$

Una vez calculadas ambas relaciones, se puede proceder al cálculo del espacio ocupado en el interior de la cámara de combustión por el hidrógeno (H₂) en una mezcla de estas características.

- **Ecuación 23:** $H_2 (\%) = \text{Número de moles de } H_2 / (\text{Número de moles de aire} + \text{número de moles de } H_2) * 100 = 2/(4,717+2)*100 = 29,77\%$.

Tras el análisis de las relaciones estequiométrica entre el aire y el combustible, se demuestra que en términos máscicos, para producir una combustión completa, por cada gramo de combustible serán necesarios 34,01 g de aire. De esta manera, se verifica que se trata de una relación mucho mayor que la requerida en motores de combustión interna basados en el empleo de gasolina, los cuales poseen una relación del orden de 15/1. Debido a que el hidrógeno (H₂) se trata de un combustible gaseoso en condiciones ambientales, genera un mayor desplazamiento sobre el volumen, que un combustible líquido en el interior de la cámara de combustión. De esta manera, el aire ocupa un menor espacio dentro de la cámara de combustión. Como se ha comprobado, el hidrógeno (H₂) ocupa un 29,77% sobre el volumen total en la cámara de combustión, en comparación con la gasolina, el cual es en torno a un 2%.

Por lo tanto, dependiendo del método empleado a la hora de introducir dicho combustible en la cámara de combustión, la energía obtenida a la salida en comparación con la obtenida al emplear gasolina, variará en importantes rangos, alrededor de un 35%.

3.23.5.3.-Propiedades de esta clase de motores.

Para el cálculo de la eficiencia termodinámica en esta clase de motores, se empleará la misma relación que en los motores que trabajan con un ciclo Otto, por lo que se basa tanto en la relación de compresión, como en la de sus calores específicos. Cuanto más elevadas sean la dichas relaciones, mayor será el rendimiento termodinámico teórico en el motor. El límite de relación de compresión en un motor, depende de la resistencia ofrecida por un combustible a sufrir golpeteo. Por ejemplo, una mezcla pobre de hidrógeno (H₂), posee una menor susceptibilidad a producir golpeteo que una gasolina, razón por la cual soporta mayores relaciones de compresión.

Por otra parte, la relación de calores específicos depende de la estructura molecular que posee el combustible. Ambas se encuentran relacionadas de manera inversamente proporcional. A la hora de tratar con el hidrógeno (H₂), se conoce que éste posee una estructura de menor complejidad que la de una gasolina, por lo cual, su relación de calores específicos será mucho mayor. (41)

Eficiencia termodinámica:

- Ecuación 24: $E = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}}$

1. E, es la eficiencia termodinámica (%).
2. V₁/V₂, consiste en la relación de compresión.
3. n, se trata de la relación de calores específicos. Para el hidrógeno (H₂) es aproximadamente 1,4, mientras que en la gasolina es 1,1.

A la hora de tratar sobre la potencia generada por un motor de hidrógeno (H₂), ésta depende por un lado de la relación entre el aire y combustible, mientras que por el otro, del sistema de inyección empleado.

Como ya se analizó en el apartado anterior, dicho gas toma el 29,77% del volumen en la cámara de combustión, por lo cual, el otro 70,23% es ocupado por el aire. Efecto de estos porcentajes, se da lugar a un menor contenido en energía que mediante el empleo de gasolina como combustible. Esto es debido a que al encontrarse esta última en estado líquido, ocupará un volumen mucho menor en la cámara de combustión, permitiendo la entrada de una mayor cantidad de aire.

En cuanto al mecanismo de inyección del hidrógeno (H₂), si se emplea el método de carburación o el sistema de inyección en el conducto de admisión, ambos realizan la mezcla entre el aire y el combustible, con anterioridad a entrar en cámara de combustión. Por lo tanto, estos dos sistemas se encuentran limitados por la potencia teórica máxima obtenida, la cual es un 20% menor a la generada mediante el empleo de otros combustibles convencionales.

Es ésta la razón por la cual los sistemas de inyección directa son los de mayor empleo en esta aplicación, debido a que realizan la mezcla entre el combustible y el aire, una vez que la válvula de admisión se encuentre cerrada. De esta manera, la potencia máxima a la salida del motor se incrementa alrededor de un 15% frente a los motores de gasolina.

Por el contrario, al emplear la relación estequiométrica calculada anteriormente entre el aire y el combustible, esto da lugar a una temperatura de combustión muy elevada, generando importantes cantidades de óxidos de nitrógeno (NO_x). Por lo tanto, los motores han de encontrarse diseñados, para trabajar con mezclas entre el aire y el combustible, inferiores a la presente relación estequiométrica. De esta forma, se trabaja con el doble de la cantidad de aire requerido teóricamente y así generar una combustión prácticamente completa, de tal manera que las emisiones de gases degradantes se reducen casi hasta valores nulos.

Finalmente, este resultado, también reduce a la mitad su potencia de salida, en comparación con un motor de gasolina de características similares. Para compensar dicho problema, los motores de hidrógeno (H₂) han de ser de mayor tamaño, al estar equipados de turbocompresores y sobre-alimentadores.

Una vez estudiados los motores de combustión interna que emplean hidrógeno (H₂) como combustible, se va a tratar sobre un novedoso sistema de propulsión de vehículos, sobre el cual se está investigando, basado en el empleo de una pila de flujo electrolítico. A pesar de ser una clase de celda de combustible que no emplea hidrógeno (H₂), ha sido incluida en el presente estudio debido a que utiliza como combustible un líquido electrolítico, el cual puede ser obtenido a partir del agua marina, tratándose de esta manera de uno de los principales portadores de dicho elemento en la naturaleza.

3.23.6.-Vehículos que basan su funcionamiento en el uso de pilas de flujo electrolítico.

Una vez estudiados por un lado los vehículos que basan su funcionamiento en el empleo de pilas de hidrógeno (H₂) y por el otro, los que lo hacen mediante motores de combustión interna diseñados para trabajar con el hidrógeno (H₂), se va a proceder tratar sobre una reciente derivación de pilas de combustible, las cuales emplean líquidos electrolíticos para su generación de energía eléctrica.

Este reciente mecanismo, se encuentra en desarrollo e investigación, contando con una serie compuesta de tres prototipos de vehículos basados en una pila de combustible electrolítica, los cuales ya han sido descritos en este estudio. Dichos prototipos de automóvil, reciben el nombre de Quant-E, Quante-FE y Quantino respectivamente, siendo diseñados por la empresa nanoFlowCell, promotora de este tipo de celdas electrolíticas. (43)

A la hora de realizar su funcionamiento, esta clase de pilas extraen la corriente eléctrica a partir de una disolución acuosa compuesta por sales metálicas concentradas. Entre una de las posibles disoluciones acuosas sobre la cual se están centrando las investigaciones, se encuentra el agua marina, debido a sus altas propiedades contenidas en las sales disueltas que lo componen. En la siguiente figura, se muestran las diferentes sales entre otros elementos que componen el agua marina, con sus respectivas concentraciones.

Tabla 28: Composición del agua marina.

Element	At.weight	ppm	Element	At.weight	ppm
Hydrogen H	1.00797	110,000	Molybdenum Mo	95.94	0.01
Oxygen O	15.9994	883,000	Ruthenium Ru	101.07	0.0000007
Sodium Na	22.9898	10,800	Rhodium Rh	102.905	.
Chlorine Cl	35.453	19,400	Palladium Pd	106.4	.
Magnesium Mg	24.312	1,290	Argentum (silver) Ag	107.870	0.00028
Sulfur S	32.064	904	Cadmium Cd	112.4	0.00011
Potassium K	39.102	392	Indium In	114.82	.
Calcium Ca	10.08	411	Stannum (tin) Sn	118.69	0.00081
Bromine Br	79.909	67.3	Antimony Sb	121.75	0.00033
Helium He	4.0026	0.0000072	Tellurium Te	127.6	.
Lithium Li	6.939	0.170	Iodine I	166.904	0.064
Beryllium Be	9.0133	0.0000006	Xenon Xe	131.30	0.000047
Boron B	10.811	4.450	Cesium Cs	132.905	0.0003
Carbon C	12.011	28.0	Barium Ba	137.34	0.021
Nitrogen ion	14.007	15.5	Lanthanum La	138.91	0.0000029
Fluorine F	18.998	13	Cerium Ce	140.12	0.0000012
Neon Ne	20.183	0.00012	Praesodymium Pr	140.907	0.00000064
Aluminium Al	26.982	0.001	Neodymium Nd	144.24	0.0000028
Silicon Si	28.086	2.9	Samarium Sm	150.35	0.00000045
Phosphorus P	30.974	0.088	Europium Eu	151.96	0.0000013
Argon Ar	39.948	0.450	Gadolinium Gd	157.25	0.0000007
Scandium Sc	44.956	<0.000004	Terbium Tb	158.924	0.00000014
Titanium Ti	47.90	0.001	Dysprosium Dy	162.50	0.00000091
Vanadium V	50.942	0.0019	Holmium Ho	164.930	0.00000022
Chromium Cr	51.996	0.0002	Erbium Er	167.26	0.00000087
Manganese Mn	54.938	0.0004	Thulium Tm	168.934	0.00000017
Ferrum (Iron) Fe	55.847	0.0034	Ytterbium Yb	173.04	0.00000082
Cobalt Co	58.933	0.00039	Lutetium Lu	174.97	0.00000015
Nickel Ni	58.71	0.0066	Hafnium Hf	178.49	<0.000008
Copper Cu	63.54	0.0009	Tantalum Ta	180.948	<0.0000025
Zinc Zn	65.37	0.005	Tungsten W	183.85	<0.000001
Gallium Ga	69.72	0.00003	Rhenium Re	186.2	0.0000084
Germanium Ge	72.59	0.00006	Osmium Os	190.2	.
Arsenic As	74.922	0.0026	Iridium Ir	192.2	.
Selenium Se	78.96	0.0009	Platinum Pt	195.09	.
Krypton Kr	83.80	0.00021	Aurum (gold) Au	196.967	0.000011
Rubidium Rb	85.47	0.120	Mercury Hg	200.59	0.00015
Strontium Sr	87.62	8.1	Thallium Tl	204.37	.
Yttrium Y	88.905	0.000013	Lead Pb	207.19	0.00003
Zirconium Zr	91.22	0.000026	Bismuth Bi	208.980	0.00002
Niobium Nb	92.906	0.000015	Thorium Th	232.04	0.0000004
			Uranium U	238.03	0.0033
			Plutonium Pu	(244)	.

Note! ppm= parts per million = mg/litre = 0.001g/kg.
Source: Karl K Turekian: *Oceans*. 1968. Prentice-Hall

Fuente: www.wordpress.com

Mediante el empleo de esta clase de celdas de flujo compactas sobre los vehículos, se obtienen importantes densidades de potencia, las cuales han sobrepasado incluso en cinco veces a las obtenidas por parte de las celdas de combustible convencionales, de acuerdo a los ensayos e investigaciones de dicha compañía. Debido a esta elevada densidad de potencia, tienen lugar importantes ventajas frente a las anteriormente estudiadas, tales como en su autonomía, pudiendo alcanzar alrededor de los 600km; en su seguridad de almacenamiento, frente al almacenaje del hidrógeno (H₂) en estado gaseoso; en la facilidad de obtención de los líquidos electrolíticos, especialmente si son obtenidos a partir del agua marina; y en su liberación de la carga eléctrica. (43)

3.23.6.1.-Celdas de flujo electrolítico (Redox) convencionales.

Las primeras pilas de flujo, también conocidas como celdas de flujo Redox, se patentaron por primera vez en 1976 por la NASA, junto con el programa espacial de Estados Unidos, como parte de una iniciativa en el almacenamiento energético durante dicho vuelo espacial. (43) Desde entonces, esta clase de celdas poseen un amplio campo de investigación a día de hoy, en numerosas aplicaciones, ya que se trata de es un medio de almacenamiento especialmente sencillo y de una elevada eficacia sobre la energía eléctrica.

El nombre de las celdas de flujo Redox, proviene de las reacciones de oxidación y reducción que en ellas tiene lugar. Mediante estas reacciones químicas, se consigue la transferencia de electrones (e⁻) de un reactivo a otro, proceso que da lugar a la generación de una corriente eléctrica. Durante dichas reacciones, el elemento reductor suministra electrones (e⁻), aumentando de esta forma su estado de oxidación, mientras que durante el elemento oxidante se encarga de captar ese flujo de electrones (e⁻), reduciendo de esta manera su estado de oxidación.

Un claro ejemplo de aplicación de las células de flujo, es su uso como sistemas de almacenamiento en las plantas de energía solar y eólica. De esta forma, se optimiza la captura energética a la hora su generación y de su almacenamiento.

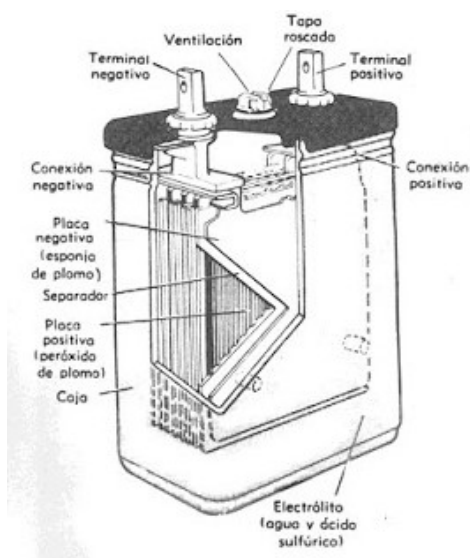


Figura 144: Pila de flujo electrolítico convencional (Redox).

Fuente: www.aplicacion-del-redox.blogspot.com

3.23.6.2.-Celda de flujo electrolítico nanoFlowCell.

Se trata de la pila de flujo electrolítico más reciente, la cual se encuentra siendo desarrollada y optimizada en los laboratorios de simulación de la compañía nanoFlowCell, en

Zúrich (Suiza). Los resultados en sus desarrollos han sido muy prometedores, debido a que con una tensión nominal de 600V y una corriente nominal de 50A, el sistema es capaz de lograr una producción continua de 30kW. En términos de capacidad de almacenamiento de energía y de densidad, es capaz de almacenar 20 veces más energía que las celdas convencionales. Esto significa una mayor autonomía de conducción. A su vez, como ya se ha comentado, posee una densidad energética en torno a cinco veces la de las celdas convencionales. (43)

Tras numerosos estudios, se ha logrado diseñar una celda de flujo especialmente potente y compacta, con una elevada capacidad de ampliación, una estructura simple y de accesible operatividad, la cual da lugar a decisivas ventajas en su uso automovilístico. Las presentes células de flujo, combinan aspectos y propiedades de una célula de acumulación electroquímica, con los de una célula de combustible convencional, como las ya estudiadas anteriormente.

Al tratarse de una celda compacta, se lleva a cabo un proceso denominado quema en frío, en el cual tienen lugar los procesos de oxidación y reducción en paralelo. Para dar lugar a su funcionamiento, los fluidos electrolíticos contenedores de sales metálicas en solución acuosa, son bombeados desde los tanques de almacenamiento, rumbo hacia dicha pila de combustible, de manera similar que en los vehículos que trabajan con hidrógeno (H₂) en estado gaseoso. A la hora de inyectar el electrolito líquido en el interior de la pila de combustible, se ha de diseñar de manera que se dé lugar a un flujo transversal de entrada. Durante la transferencia de energía en el interior de una celda de flujo, la carga pasa entre las placas metálicas que actúan como ánodo y entre las láminas del cátodo, a través de un líquido ionizable.

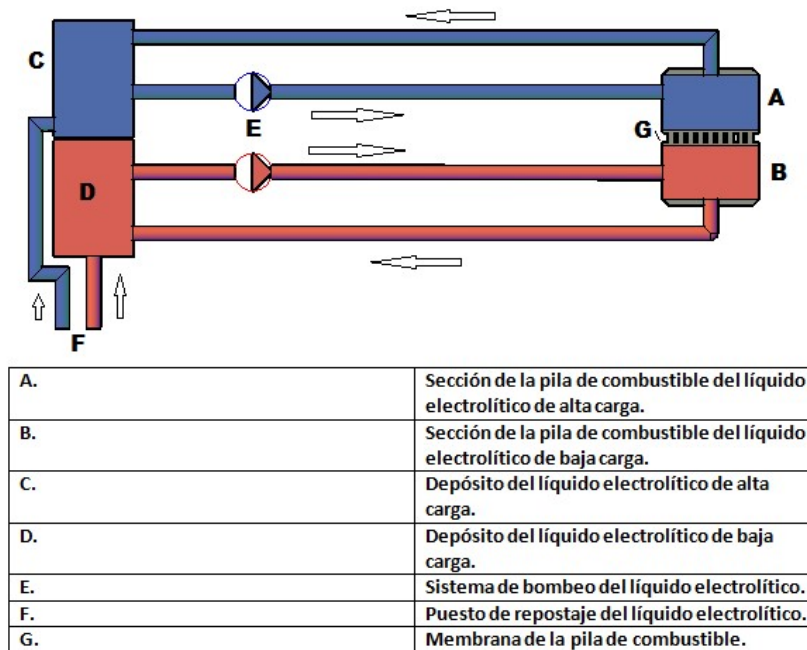


Figura 145: Esquema de funcionamiento de una pila de flujo electroquímica nanoFlowCell.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Mediante esta estructura, una de las principales ventajas dentro este sistema, es que los depósitos de almacenamiento con elevado volumen, dan lugar a una mayor capacidad de energía. A su vez, la concentración de una solución electrolítica determina la cantidad de energía transportada, por lo que soluciones de elevadas densidades energéticas, están abriendo amplios horizontes en el área del automóvil. Las células de flujo de hoy en día, ya poseen altas densidades de potencia, siendo a su vez de mayor vida útil y sin sufrir el efecto memoria.

El elemento clave de estos modelos de celdas, se encuentra en las características de sus fluidos electrolíticos, compuestos por combinaciones de sales metálicas de muy alta concentración. Las partículas portadoras de carga dentro del fluido, se han logrado llevar a elevados niveles de densidad de carga, mediante el uso de procesos nano-mecánicos de la química cuántica.

Durante su funcionamiento, para realizar su carga y descarga, se emplean dos soluciones electrolíticas a modo de combustible, las cuales son bombeadas a través de la celda de manera transversal, lugar en el cual se encuentran los electrodos. Ambas soluciones electrolíticas, se encuentran separadas mediante una membrana transparente de alta resistencia, ya que no se debe producir la mezcla entre los iones de alta carga y los de baja carga debido a que esto sería inútil a la hora de generar energía eléctrica.

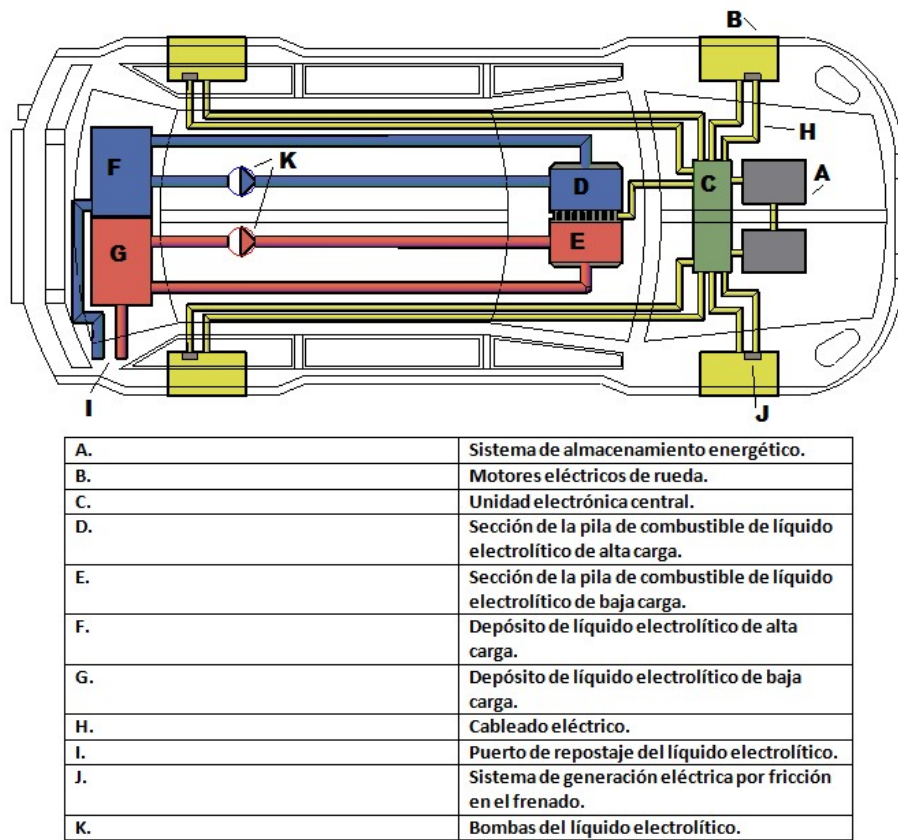


Figura 146: Componentes básicos de un vehículo propulsado por una pila de flujo electrolítico, realizado en Auto CAD.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

En el sistema, el encargado de propulsar al vehículo, al igual que en el resto de los automóviles de pila de combustible, es un motor eléctrico. En el caso de los prototipos diseñados por nanoFlowCell, se emplean cuatro motores de rueda proporcionando una tracción tanto delantera como trasera. Junto a los tanques de almacenamiento de combustible, se sitúa la pila de flujo electrolítico, la cual envía la energía tanto a los anteriores motores, como hacia el sistema de almacenamiento central.

Esta unidad de almacenamiento central de energía, puede estar formado bien por las diferentes clases de baterías explicadas, o mediante dos grandes condensadores de alto rendimiento, también denominados supercondensadores, los cuales están contruidos de acuerdo a las especificaciones de los modelos actuales. (43)

Este tipo de condensadores de alto rendimiento, son unos dispositivos similares a los condensadores clásicos comúnmente empleados en circuitos eléctricos y electrónicos, pero que se caracterizan por tener una elevada capacidad de carga. Gracias a dicha característica, pueden usarse para sustituir a las baterías en gran parte de las ocasiones, con la ventaja de su gran rapidez de carga y descarga, y junto con el gran número de ciclos de vida útil que soportan, siendo generalmente superiores a los de las baterías actuales. La mayor parte de los

avances en el campo de los supercondensadores se están dando lugar gracias a los nuevos materiales basados en nano-partículas o nano-estructuras, como por ejemplo el grafeno, al igual que en otros sistemas de almacenamiento energético.

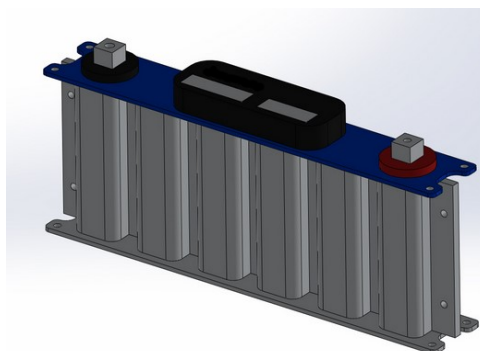


Figura 147: Condensador de alto rendimiento modelado en Auto CAD.

Fuente: Figura realizada en Auto CAD 3D.

La unidad de almacenamiento es la encargada de almacenar la tanto la energía eléctrica generada por la pila, como la generada mediante el frenado regenerativo del vehículo. A su vez, se utilizan para hacer funcionar al sistema computacional y electrónico del sistema, junto con la aportación de corriente eléctrica al motor durante las elevadas demandas de energía, tales como en la aceleración, en la mejora de la eficiencia total del sistema y en el ahorro del combustible. Finalmente, estabiliza el potencial en el sistema eléctrico, ya que en determinadas ocasiones, se reducen momentáneamente las altas tensiones ocurridos en el sistema eléctrico de los vehículos.

Para realizar el control centralizado de todos sus componentes, se incorpora una unidad electrónica de control, responsable del control durante la conducción y durante las corrientes de carga a lo largo de todo el tren de potencia.

3.23.6.3.-Ventajas de emplear celdas de flujo electrolítico.

Este reciente modelo de celda de flujo electrolítico, da lugar a numerosas ventajas tanto a nivel técnico y funcional, como a nivel de impacto ambiental. En un primer lugar, los diferentes prototipos empleados en los vehículos que emplean este sistema, han logrado superar eficiencias del orden del 80%, junto con densidades de energía, las cuales rondan los 600Wh/l. Su temperatura de operación no es demasiado elevada, ya que trabaja en un rango de temperaturas de entre los 60 y los 160°C. Otra de sus ventajas a destacar, es su elevada vida útil, alcanzando los 10.000 ciclos de carga, sin experimentar notables efectos de memoria y apenas sin sufrir auto-descargas. (43)

En cuanto a la capacidad de sus tanques de almacenamiento empleados en sus prototipos de vehículos, éste es uno de los puntos en desarrollo, debido a que emplean importantes volúmenes, para así incrementar su densidad energética. Esta capacidad, puede

ser un importante punto a favor, ya que por ejemplo en uno de sus modelos el Quant-E, el cual posee un depósito de 200 litros, puede alcanzar densidades de energía de hasta los 120kWh. (12)

Estos depósitos, pueden ser incrementados como ya se ha hecho en sus posteriores modelos, debido a que resulta más sencillo para los fabricantes de automóviles integrar un mayor volumen de tanque en carrocerías para los vehículos modernos, que agregar o ampliar los sistemas de baterías pesadas con complejas conexiones y conductos. Sin embargo, estos volúmenes tan elevados, dan lugar a importantes periodos de repostaje y a elevadas cantidades de combustible.

A la hora de tratar sobre sus cifras de consumo, esta clase de mecanismos emplean consumos similares a los automóviles que trabajan con otro tipo de celdas de combustible o baterías eléctricas, por lo que rondan los 20kW/h. (43)

3.23.6.4.-Repostaje del flujo electrolítico.

Como en el resto de vehículos existentes, una vez que la reserva se agota, el contenido de sus depósitos, debe ser reemplazado. Este proceso no es más complicado que llenar un vehículo de propulsión convencional en la actualidad, ya que posee un sistema de doble depósito con cuellos duales de relleno, una para cada electrolito y así mantener los tiempos para la sustitución de dicho líquido electrolítico. (43)



Figura 148: Estación de repostaje del fluido electrolítico (nanoFlowCell).

Fuente: www.nanoflowcell.com

La principal diferencia con respecto a todos los otros sistemas de almacenamiento es su elevado volumen, por lo cual tanto el tiempo de repostaje como la cantidad de fluido a repostar, es bastante alto a día de hoy.

3.23.6.5.-Comportamiento de las celdas de flujo electrolítico ante el medio ambiente.

El sistema de celdas nanoFlowCell, emplea componentes que no sólo son inofensivos, sino que también se encuentran fácilmente disponibles en grandes cantidades, ya que no hace

uso de metales preciosos o aleaciones costosas de producir. Los principales componentes de la célula son el agua (H_2O) de la solución electrolítica junto con sus sales metálicas y las estructuras cristalinas que se han combinado en los procesos medioambientales y de las que se pueden disponer sin impacto ambiental alguno.

Los estudios realizados, indican que este sistema no causaría ninguna complicación ambiental durante su funcionamiento o eliminación. (43) El estado actual de desarrollo también indica que el sistema también podría funcionar durante una vida útil prolongada, de mayor rango que en otros tipos de celdas.

3.24.-El hidrógeno (H_2) como combustible del automóvil.

Una vez analizados los diferentes sistemas empleados en la propulsión de un automóvil, se va a proceder a continuar con el análisis del hidrógeno (H_2) como combustible, ya que se trata del elemento base a utilizar por los presentes mecanismos. En el siguiente apartado, se comenzará con una breve descripción sobre dicho elemento a nivel atómico, junto con sus propiedades e isótopos, para a continuación poder estudiar sus diferentes métodos de producción.

3.24.1.-El átomo de hidrógeno (H).

Consiste en el primer elemento de la tabla periódica, tratándose en condiciones normales como un gas incoloro, inodoro e insípido. Generalmente, se encuentra compuesto de moléculas diatómicas, es decir, en forma de H_2 , aunque puede ser dissociado en átomos libres tras aplicarle elevadas temperaturas. (7)

Un átomo de hidrógeno (H), consta básicamente de un núcleo de unidad de carga positiva (protón) y un solo electrón (e^-). Posee un número atómico equivalente a la unidad y un peso atómico igual a 1,00797u.m.a. En la siguiente figura se muestra un esquema de un átomo de hidrógeno.

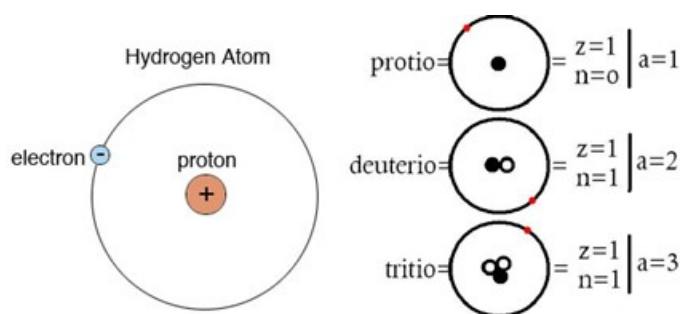


Figura 149: Representaciones de un átomo de hidrógeno (H), un isótopo protio (H^1), un isótopo de deuterio (H^2) y otro isótopo de tritio (H^3).

Fuente: www.wordpress.com

A su vez, es uno de los principales elementos constituyentes tanto en nuestro planeta como en todo el universo, ya que se encuentra en la molécula de agua (H₂O) o en toda la materia orgánica. En la naturaleza, existen tres isótopos del hidrógeno (H₂), los cuales reciben el nombre de protio, deuterio y tritio respectivamente, mientras que el ser humano ha conseguido sintetizar otros cuatro isótopos artificiales, con la característica de ser bastante inestables. (7)

Tabla 29: propiedades de los isótopos del hidrógeno existentes.

Protio (H¹).	Es un isotopo bastante estable y común del hidrogeno (H ₂), con una abundancia natural del orden del 99,985 %, en número de átomos. Está constituido por un único protón en su núcleo atómico, junto con un electrón que orbita a su alrededor. En el planeta, se encuentra de manera biatómica, a diferencia que en el espacio, que lo hace de manera aislada, actuando como combustible de las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en las estrellas. Sus propiedades coinciden fundamentalmente con las de un átomo de hidrógeno (H ₂).
Deuterio (H²).	Es otro isótopo estable del hidrogeno (H ₂), que se encuentra en la naturaleza con una abundancia del orden del 0,015%, fundamentalmente en las aguas oceánicas, debido a su elevada densidad. Está constituido por un protón y un neutrón en el núcleo, junto con un electrón que orbita a su alrededor. Su existencia en el sistema solar, es un dato importante para la ciencia, ya que la fusión estelar destruye el deuterio y no hay procesos de creación naturales conocidos, a excepción de la nucleosíntesis, tratándose de un proceso muy costoso. De esta manera, la existencia de este isótopo, juega un argumento a favor de la teoría del Big Bang.
Tritio (H³).	Se trata del tercer isotopo radioactivo del hidrogeno (H ₂), encontrándose en la naturaleza con abundancias muy pobres. Su formación se debe a la interacción entre los rayos cósmicos y los gases atmosféricos, aunque también ha sido generado en armamento nuclear mediante bombardeo con neutrones de litio (Li), boro (B) o nitrógeno (N). Está constituido por un protón y dos neutrones en su núcleo, junto con un electrón que orbita a su alrededor. Este isótopo, posee una vida media de doce años y a medida que se degrada, emite un electrón, causando una radiación beta y dando lugar al isótopo de helio tres (³ He ⁺).
H⁴.	Este isótopo artificial, puede ser sintetizado mediante el bombardeo de tritio (H ³) con núcleos de deuterio (H ²) a alta velocidad. Se desintegra por emisión de neutrones, con un periodo de vida que ronda los 9,93696*10 ⁻²³ segundos.
H⁵.	Dicho isótopo, es obtenido mediante el bombardeo de átomos de hidrogeno (H ₂) con iones pesados. Su periodo de desintegración, alcanza los 8,01930*10 ⁻²³ segundos.
H⁶.	Este sexto isótopo, se desintegra por la triple emisión de neutrones, obteniendo un periodo de vida de 3,26500*10 ⁻²² segundos.
H⁷.	El último isótopo del hidrógeno (H ₂), se produce colisionando un haz de

	isótopos de helio ocho (⁸ He ⁺) sobre un conjunto de átomos de hidrogeno (H ₂) criogenizados.

Por otro lado, cuando uno de estos isótopos pierde su electrón, se generan los denominados hidrones, mejor conocidos como cationes de hidrógeno (H⁺). Según el isótopo origen de estos cationes, se puede encontrar principalmente el protón (¹H⁺), el deuterón (²H⁺) y el tritón (³H⁺). Estos cationes del hidrógeno (H₂), son difíciles de encontrar, ya que gran parte de ellos forman parte de complejos compuestos, los cuales desempeñan principalmente funciones en las reacciones estelares.

3.24.2.-Propiedades del hidrógeno (H₂).

A continuación se muestran las principales características que hacen del hidrógeno (H₂) uno de los vectores energéticos más prometedores para las próximas décadas. (7)

- a) Olor, color y sabor: Este elemento en estado puro, es inodoro, incoloro y es insípido. Sin embargo, existen métodos para controlar sus fugas y su llama generada, como puede ser dotarlo con un olor capaz de permitir su detección de manera olfativa. En cuanto a las fugas de hidrogeno (H₂), éstas pueden ser de elevado peligro, ya que existe el riesgo de incendiarse al mezclarse con el oxígeno (O₂). A su vez, el pequeño tamaño de su molécula, también da lugar a su rápida dilución, fundamentalmente al aire libre y si dicho elemento se encuentra en estado líquido, la fuga se evapora fácilmente, debido a su bajo punto de ebullición.
- b) Volumen específico: Esta propiedad expresa la cantidad de volumen en una unidad de masa. Por lo tanto, su volumen específico en estado gaseoso a 25°C y 1 atmósfera es igual a 11,9m³/kg, mientras que en estado líquido a -253°C y 1 atmósfera, es de 0,014m³/kg.
- c) Densidad: La cual expresa la cantidad de masa contenida en una unidad de volumen, por lo que ha de tener asignado un valor de temperatura y de presión específico, ya que ambos parámetros influyen en el enlace molecular, especialmente en los gases. El hidrogeno (H₂) posee una densidad en estado gaseoso de 0,08376 kg/m³, junto con una densidad en estado líquido de 0,0708 kg en cada litro.
- d) Relación de expansión: Su relación de expansión es de 1/848, lo que significa que en su estado gaseoso y en condiciones atmosféricas, ocupa 848 veces más que en estado líquido. Si el hidrogeno (H₂) es almacenado en estado gaseoso a 250 bar y a 25°C, ahora su relación de expansión es de 1/240.

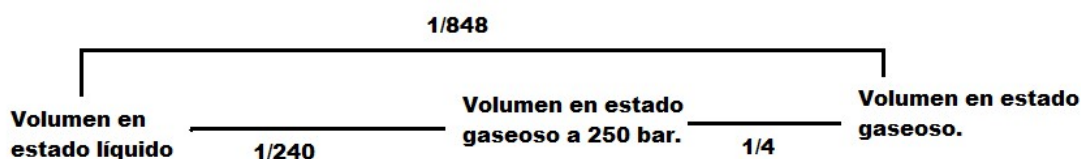


Figura 150: Relaciones de expansión del H₂.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

- e) **Toxicidad:** Dicho elemento, no resulta tóxico para la salud humana, pero puede actuar como asfixiante debido a que desplaza el oxígeno (O₂) que se sitúa en el aire. Por la presente razón, se debe tener precaución a la hora de manipular hidrógeno (H₂) en recintos cerrados, ya que una fuga podría llegar a causar la muerte por asfixia.
- f) **Estado:** Se trata del segundo elemento químico con los puntos de ebullición y de fusión más bajos. En condiciones atmosféricas, se puede encontrar en estado líquido por debajo de los -252,77 °C y en estado sólido por debajo de los -259,2 °C. Por lo tanto, en estado líquido, se trata de un líquido criogénico, ya que su temperatura se encuentra por debajo de -73 °C, siendo un inconveniente. A pesar de que el punto de ebullición de una sustancia pura aumenta a medida que se incrementa su presión, en el caso del hidrógeno (H₂), éste solo se consigue aumentar hasta los -240 °C, aplicando alrededor de 13 bares de presión. En la siguiente tabla, se muestran algunos valores del factor de compresión sobre el hidrógeno (H₂), a medida que se le incrementa su presión.

Tabla 30: Factor de compresión en función de la presión.

Presión en bares.	Factor de compresión.
1	1
100	1,065
200	1,132
300	1,201
500	1,344
800	1,560
1000	1,700

- g) **Capacidad calorífica (Cp):** Su capacidad calorífica específica, posee un valor específico a presión constante de 28,623kJ/(kmol*Kº), junto con un otro valor a volumen constante de 20,309kJ/(kmol*Kº).
- h) **Densidad energética:** Esta propiedad indica la cantidad de energía existente en un volumen determinado. En el presente elemento, su valor es bastante bajo, ya que dispone de una baja densidad. Sin embargo, la relación entre su peso y su energía es la

mejor de todos los combustibles al ser tan ligero y no disponer de átomos de carbón pesados. En cuanto a su cantidad de energía liberada, ésta es alrededor de un 2,5 del calor generado tras la combustión de los hidrocarburos convencionales.

- i) Poder calorífico inferior (PCI): Consiste en el calor que realmente se aprovecha tras la reacción de combustión, sin emplear la energía de la condensación del agua (H_2O), entre de los otros procesos. Posee un valor igual a de 119,93kJ/g, en condiciones atmosféricas.
- j) Poder calorífico superior (PCS): Es la cantidad total de calor desprendido tras la combustión completa de 1 kg de combustible cuando el vapor de agua originado es condensado y se puede contabilizar. Posee un valor en condiciones atmosféricas equivalente a 141,86kJ/g.
- k) Grado de inflamabilidad: Para producir la reacción del hidrogeno (H_2), se necesita de un comburente, como el oxígeno (O_2) y de una fuente para comenzar la reacción. Para aprovechar la mayor cantidad de dicho elemento, es necesario que se encuentre en estado gaseoso. Por lo tanto, la propiedad que describe la facilidad de evaporar los combustibles, es el punto de inflamación. Para el hidrógeno (H_2), éste posee un valor igual a $-253^{\circ}C$. En cuanto al rango de concentración de comburente para iniciar su inflamabilidad, el hidrogeno (H_2) es inflamable en un amplio límite de concentraciones de aire, el cual va desde un 4% hasta un 75%, mientras que resulta explosivo sobre una gama de concentraciones entre un 15% y un 59%. Todos estos valores han sido calculados en condiciones atmosféricas.
- l) La llama de hidrógeno (H_2): Esta clase de llamas poseen un color azulado, por lo que resultan casi invisibles a la luz del día. Sin embargo, su visibilidad es incrementada con la presencia de humedad u otras partículas contenidas en el aire, llegando a ser fácilmente visibles en la oscuridad y mediante luces artificiales. Generalmente, los incendios de este gas, resultan de alta seguridad, ya que dicho elemento se eleva rápidamente debido a sus alto grado de difusión, siendo verticales y fácilmente localizables.
- m) Temperatura de autoencendido: Se trata de la mínima temperatura necesaria para iniciar la combustión de una mezcla de combustible en ausencia de fuente de ignición. Para el hidrogeno (H_2), esta temperatura es de unos $585^{\circ}C$, suponiendo una ventaja, debido a la dificultad de generar una ignición no deseada sin una fuente adicional.
- n) Energía de ignición: Es la energía externa que debe aplicarse para encender la mezcla entre el combustible y el comburente, la cual posee un valor de 0,02mJ, por lo que el hidrógeno (H_2) resulta bastante propenso a inflamarse. Además, posee la característica agregada de su baja electro-conductividad, debido a que la agitación del hidrogeno

(H₂) puede generar cargas electroestáticas y dar lugar chispazos. Por esta razón, el equipo de transporte debe disponer de una toma de tierra.

- o) Velocidad de la llama: Se trata de la velocidad a la cual viaja la llama a través de una mezcla entre dicho combustible y su comburente. Se calcula sumando la velocidad de quemado, más su velocidad de desplazamiento en la mezcla que aún no ha sido quemada. En el hidrógeno (H₂), varía entre 2,65m/s y entre 3,25m/s. Por lo tanto, en una fuga se quemará velozmente, siendo ésta de breve duración.
- p) Distancia de apagado: Se refiere a la distancia a la cual se apaga la llama tomando como referencia la pared del cilindro, debido a las pérdidas de calor en un motor de combustión interna. En el hidrogeno (H₂), posee un valor de 0,064cm, siendo aproximadamente un tercio menor que en otros combustibles convencionales. Por esta razón, las llamas que produce el hidrogeno (H₂) al quemarse, circulan más cerca de la pared del cilindro antes de desaparecer, resultando bastante complicadas de apagar. Este valor en la distancia de apagado, puede incrementar a su vez la tendencia al petardeo, debido a que la llama tiene la posibilidad de circular cerca de una válvula que se encuentre entreabierta.
- q) Octanaje: El presente elemento, posee un elevado número de octano, siendo especialmente resistente ante los golpeteos. Esto lo ha convertido en un especial atractivo como combustible en los motores de combustión interna, ya que la mezcla no explota de manera no intencionada.
- r) Fragilización: Se trata de una pérdida sobre la resistencia y la ductilidad en los materiales, inducida por el hidrogeno (H₂), la cual puede generar importantes fracturas mecánicas. Este fenómeno, sucede a tensiones de muy bajo valor, siendo a día de hoy bastante complicado prever su aparición. Los principales factores que se conocen, los cuales son causantes de dicho efecto, son la concentración y micro-estructura del material, la temperatura, su pureza, la humedad, la presión o su nivel de fatiga. Las aleaciones capaces de resistir a la fragilización, son básicamente el acero inoxidable, el cobre, el aluminio, la fibra de carbono y la fibra de vidrio, junto con ciertas estructuras poliméricas.
- s) Efectos ambientales: Los efectos de este gas sobre el reino animal serán debidos únicamente a los ambientes deficientes de oxígeno (O₂). Por otro lado, actualmente no se anticipa que tengan efectos adversos sobre el reino vegetal, aparte de las heladas que pueden ser generadas con la presencia de los gases de expansión rápida. Finalmente, tampoco se dispone de evidencias sobre efecto negativos del hidrógeno (H₂) sobre la vida marina.

Finalmente, se exponen en la siguiente tabla algunas de las propiedades más significativas de este combustible.

Tabla 31: Propiedades del hidrógeno (H₂).

Temperatura de auto ignición (K°).	858
Mínima energía de ignición (mJ).	0,02
Límites de inflamabilidad en el aire (%en vol.).	4-75
Límites de detonación en el aire (% en vol.)	15-59
Temperatura de la llama (K°).	2318
Velocidad de detonación (km/s).	1,5-2,2
Velocidad de la llama (m/s).	2,65-3,25
Distancia de apagado (cm).	0,064
Sobrepresión de la detonación (kPa).	1470
Volumen específico en estado gaseoso a 298K° y 1atm (m ³ /kg).	11,9
Volumen específico en estado líquido a 20K° y 1atm (m ³ /kg).	0,014
Calor de combustión inferior (kJ/g).	119,93
Calor de combustión superior (kJ/g).	141,86
Porcentaje de energía térmica radiactiva (%).	21
Flujo de calor emitido (kJ/cm ² *s).	0,0153
Energía de explosión (kg*TNT/m ³).	2
Velocidad de difusión en el aire (cm/s).	2
Coeficiente de difusión (cm ² /s).	0,61
Viscosidad (g/cm*s).	8,9*10 ⁻⁵
Peso molecular (g/mol).	2,02
Punto de ebullición (K°).	20,3
Toxicidad.	No es tóxico.
Relación de expansión.	1/848
Densidad a 273°K y 1atm (kg/m ³).	0,0838
Densidad a 298K° y 1atm (kg/m ³).	0,0893
Densidad en estado gaseoso a 70MPa (kg/l).	0,040816
Densidad en estado gaseoso a 35MPa (kg/l).	0,02403
Densidad en estado gaseoso a 20MPa (kg/l).	0,016
Densidad en estado gaseoso a 1MPa (kg/l).	0,009
Densidad en estado líquido a 20K° y 1atm (kg/l).	0,0708
Calor de vaporización (MJ/kg).	0,46

3.24.3.-Métodos de producción del hidrógeno (H₂).

Una vez estudiado el hidrógeno (H₂) como combustible junto con sus diferentes propiedades, se va a proceder a analizar los diferentes métodos que existen actualmente para su generación.

3.24.3.1.-Obtención del hidrógeno (H₂) a partir del reformado metano (CH₄) o del gas natural.

El método más empleado hasta la actualidad en la producción de hidrógeno (H₂) a escala industrial, ha sido el reformado del metano (CH₄) o gas natural, mediante vapor de agua (H₂O), debido a que ha sido la tecnología más económica hasta día de hoy. Sin embargo, esta metodología se encuentra en una situación de declive tras la aparición de novedosos métodos los cuales no requieren de hidrocarburos. La reacción que tiene lugar en este proceso es la siguiente. (44)



En este proceso, el gas natural entra en reacción con el vapor de agua (H₂O) mediante un catalizador de níquel (Ni), el cual se encuentra colocado sobre un reformador primario a una temperatura que ronda los 1.200Kº y a una presión de entre los 20 y los 30 bares.

De acuerdo a que el gas natural contiene impurezas de azufre (S), se requiere anteriormente de una etapa con la cual se eliminen estos contaminante y así poder prevenir el deterioro de la actividad catalítica. En un segundo lugar, la corriente depurada del metano (CH₄), se hace reaccionar con el vapor de agua (H₂O) en el interior de un reactor, al que se le incorpora el catalizador de níquel (Ni) para disminuir la temperatura de reacción hasta los 973Kº.

El producto a la salida, es rico en hidrógeno (H₂) pero contiene una cierta proporción de monóxido de carbono (CO), que a su vez es transformado en un segundo reactor en hidrógeno (H₂) adicional, mediante una reacción con vapor de agua (H₂O). En determinadas ocasiones, en este punto del proceso se pueden emplear dos reactores.



Por lo tanto, como se puede observar en la reacción anterior, el gas resultante posee un contenido elevado de hidrógeno (H₂) , junto con cantidades de dióxido de carbono (CO₂) y otras proporciones mucho menores de metano (CH₄) no convertido y monóxido de carbono (CO) remanente, que normalmente rondan un 1% en volumen. Para reducir el contenido de los productos no deseados, en las plantas modernas, se incorporan unidades de purificación mediante métodos de compresión, adsorción y desorción, los cuales permiten obtener un hidrógeno (H₂) de elevada pureza, que ronda el 99% en volumen. (44)



Figura 151: Planta de reformado de gas natural.

Fuente: www.fgcsic.es

A su vez, el gas natural contiene pequeñas proporciones de otros hidrocarburos, fundamentalmente etano (C₂H₆), propano (C₃H₈) y butano (C₄H₁₀). Estos hidrocarburos, poseen un grado de descomposición bastante alto, generando residuos carbonosos en las condiciones del reformado del metano (CH₄). Por este motivo, también se requiere de una previa etapa de pre-reformado, con la que poder transformar una parte de estos hidrocarburos presentes en una mezcla de monóxido de carbono (CO) con hidrógeno (H₂). Para su finalidad, este proceso ha de ser incorporado antes que la unidad central de reformado, permitiendo de esta manera operar con una alta variedad de alimentaciones, asegurando así, que la alimentación sea constante en todas las unidades de reformado.

Dicha etapa de pre-reformado, genera un importante efecto sobre la composición gaseosa que alimenta a la unidad de reformado con vapor. Mediante esta técnica, los hidrocarburos con las cadenas más largas son eliminados completamente, al mismo tiempo que se transforma una fracción del metano (CH₄). Debido a que estos hidrocarburos de largas cadenas dan lugar a una tendencia a formar carbono, este proceso de pre-reformado reduce notablemente la formación de residuos carbonosos durante el proceso de reformado del metano (CH₄). Producto de este suceso, los tiempos de vida en los sistemas catalíticos empleados se incrementan. (7)

Por otro lado, el vapor de agua (H₂O) empleado en la reacción del reformado, puede ser reemplazado por dióxido de carbono (CO₂), por oxígeno (O₂) o por una mezcla de ambos compuestos. Estas variantes en la tecnología del reformado, son similares al proceso convencional, con la diferencia fundamental de que ambos gases se aplican a la hora de utilizar la mezcla entre el monóxido de carbono (CO) y el hidrógeno (H₂), en la fabricación de hidrocarburos o de metano, en lugar de generar exclusivamente hidrógeno (H₂).

3.24.3.2.-Obtención del hidrógeno (H₂) a partir del metanol (CH₄O).

Al igual que se emplea el metano (CH₄), también se puede utilizar de igual manera el metanol (CH₄O) en la producción industrial del hidrógeno (H₂). (44) Durante, este proceso, al

metanol (CH₄O) se le hace reaccionar con vapor de agua (H₂O) sobre un catalizador y así poder producir el producto deseado. Se trata de una reacción endotérmica, ya que el calor requerido es obtenido a través de la combustión del gas de cola junto a otra pequeña fracción de metanol (CH₄O).



Durante este proceso, la corriente de hidrógeno (H₂) es purificada en una etapa de adsorción y otra de desorción, de igual forma que en el reformado de metano (CH₄). Esta reacción es bastante sencilla, debido a que no se tienen en cuenta la formación de compuestos oxigenados intermedios.

Debido a la elevada disponibilidad y a la importante red en la distribución de los gases licuados del petróleo y de sus destilados a día de hoy, hacen de estas fracciones unos candidatos idóneos en la producción del hidrógeno (H₂).

Por el contrario, se han dedicado muy poca atención al desarrollo de un proceso basado en estos combustibles, debido a que se deposita gran cantidad de carbón en la superficie del catalizador. Para la reducción de estas partículas carbonosas, los reactores deben de estar circundados de un horno eléctrico que eleve la temperatura de la mezcla entre el hidrocarburo y el aire. A su salida, éstas han de ser eliminadas en forma de sulfuro de hidrógeno (H₂S), para a continuación inyectar el vapor de agua (H₂O) antes de incorporar el reactor de desplazamiento del gas de agua.

En los productos, el monóxido de carbono (CO), se mantiene en niveles inferiores a las diez partes por millón, lo que se logra haciendo pasar la corriente a través de catalizadores de elevada actividad y selectividad, los cuales son capaces de oxidar las impurezas de monóxido de carbono (CO) a dióxido de carbono (CO₂), a una temperatura ambiente.

Los reformadores, hoy en día operan de manera satisfactoria con varios tipos de combustible. Sin embargo, los problemas derivados por la presencia de compuestos de azufre (S) o los depósitos de coque sobre los catalizadores, aún no están totalmente resueltos. Teniendo en cuenta el bajo impacto que genera esta tecnología en el medio ambiente, los fabricantes de automóviles la consideran como una de las opciones posibles para generar el hidrógeno (H₂) como combustible para el automovilismo.

Ahora bien, otra opción sobre la cual se está investigando, es en la producción de hidrógeno (H₂) a bordo del automóvil, a partir del metanol (CH₄O), para su consumo in situ. De esta manera, el hidrógeno (H₂) puede obtenerse mediante tres vías catalíticas diferentes. La primera es mediante la oxidación parcial con oxígeno (O₂) o aire; la segunda mediante reformado con vapor de agua (H₂O), al igual que de manera industrial; y la tercera mediante descomposición.

1. $\text{CH}_3\text{OH} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	Oxidación parcial con oxígeno (O₂).
2. $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$	Reformado con vapor de agua (H₂O).
3. $\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	Descomposición.

De estas tres alternativas, la oxidación parcial ofrece ventajas claras con respecto al reformado mediante el vapor de agua (H₂O), ya que se emplea aire en vez de vapor y a su vez, es una reacción exotérmica, por lo que no requiere un aporte de energía externa durante la operación.

Sin embargo, estas ventajas se contrarrestan con la producción de una cantidad de hidrógeno (H₂) menor, ya que la relación molar estequiométrica entre el hidrógeno (H₂) y el monóxido de carbono (CO) en la reacción de oxidación parcial es equivalente a 2, mientras que en el reformado con vapor es igual a 3. También se ha de tener en cuenta que los productos gaseosos resultantes tras el reformado, poseen un 8% más de poder calorífico que el metanol puro (CH₄O), lo cual significa una mayor eficiencia térmica en el reactor. Esto sólo es posible mediante la recuperación de una parte de la energía calorífica que contienen los gases de escape, los cuales se emplean para vencer la endotermicidad de la reacción de reformado. La composición de dichos gases a la salida del reformador, depende del tiempo de residencia, de su temperatura, de su presión, de la relación entre el oxígeno (O₂) y el metanol (CH₄O) en la alimentación o el tipo de catalizador empleado.

A continuación se muestra una gráfica, la cual representa la selectividad del hidrógeno (H₂), en función de la conversión del metanol (CH₄O), al emplear diferentes catalizadores.

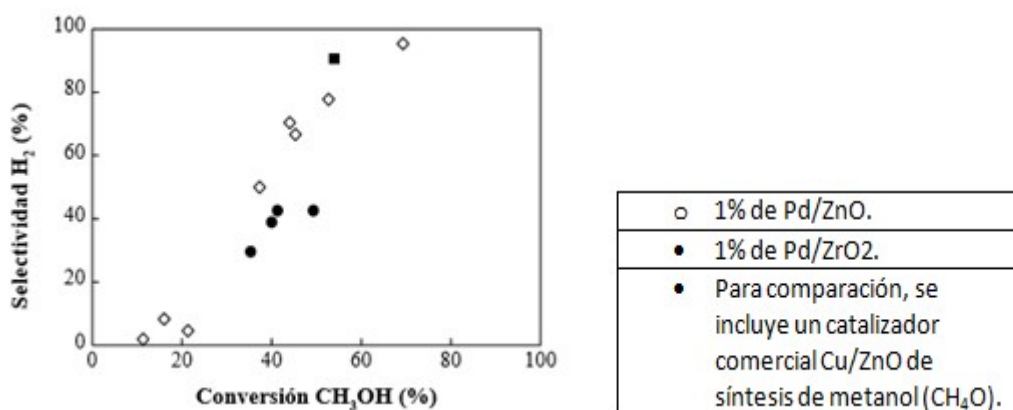


Figura 152: Selectividad de H₂ en función de la conversión del CH₃OH sobre varios catalizadores.

Fuente: Estudio sobre el hidrógeno (H₂), un vector energético no contaminante para la automoción, realizado por J.L.G. Fierro, L. Gómez y M.A. Peña, pertenecientes al Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC).

Análisis de la figura:

Para tener una idea del estado y del alcance de estas tecnologías, en la figura anterior, como se había comentado, se representa la selectividad del hidrógeno (H₂) alcanzada sobre los diferentes catalizadores que operan con una relación entre el oxígeno (O₂) y el metanol (CH₄O), equivalente a un valor de 0,3 durante su alimentación.

Se observa que la selectividad del hidrógeno (H₂) se incrementa conforme lo hace la conversión de metanol, alcanzando selectividad prácticamente total para conversiones próximas al 80%. Además, para un determinado catalizador, la selectividad del monóxido de

carbono (CO) decrece conforme aumenta la conversión.

La baja eficiencia térmica en la oxidación parcial de metanol (CH₄O) debido a que se trata de un proceso exotérmico, puede incrementarse al combinarse con reformado mediante vapor de agua (H₂O), ya que éste es endotérmico. De esta manera, se consigue lograr un balance energético prácticamente nulo y una eficiencia óptima.

A su vez, este proceso se puede llevar a cabo tanto en ausencia, como en presencia de catalizadores. En el proceso no catalítico, se requiere de temperaturas muy elevadas para alcanzar las conversiones y las distribuciones de los productos que predice el equilibrio termodinámico. Sin embargo, los catalizadores realizan la reacción a temperaturas de menor valor, como se comentó anteriormente. A continuación, se muestran los principales elementos empleados como catalizadores en la conversión del metanol (CH₄O). (45)

Tabla 32: Catalizadores para la conversión del metanol (CH₄O).

1. Cobre (Cu).
2. Níquel (Ni).
3. Platino (Pt).
4. Paladio (Pd).

Los dos últimos, han resultado de una menor selectividad en el reformado con vapor, ya que producen monóxido de carbono (CO) tras su descomposición.

Por lo tanto, en una celda de combustible polimérica de un vehículo, en un primer lugar el metanol (CH₄O) se transforma en una mezcla de hidrógeno (H₂) y dióxido de carbono (CO₂) en el interior de un reactor, gracias al catalizador. La mezcla resultante contiene pequeñas cantidades de monóxido de carbono (CO), que resultan tanto de la contribución de la reacción de descomposición, como de la reacción inversa del vapor de agua (H₂O).



Este monóxido de carbono (CO) producido, se ha de reducir hasta niveles de partes por millón en la corriente gaseosa que alimenta la pila, puesto que se trata de un importante veneno sobre el electro-catalizador del ánodo. Las alternativas propuestas para reducir o eliminar esta sustancia, se basan tanto en procesos químicos como físicos. Por ejemplo, su oxidación catalítica selectiva parece bastante atractiva. Sin embargo, se debe resaltar el hecho de que dicha oxidación, se ha de producir sin que el agente oxidante logre oxidar el hidrógeno (H₂), ya que se trata del principal componente de la corriente gaseosa que alimenta la pila.

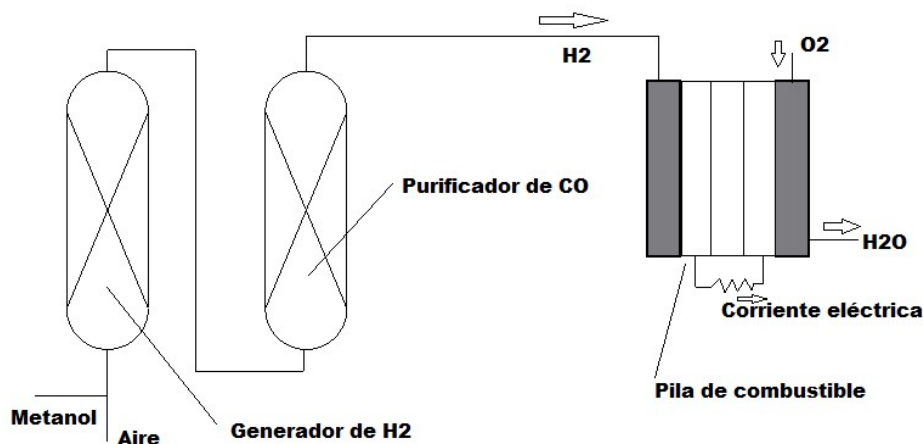


Figura 153: Esquema genérico sobre el ensamblaje de los procesos individuales que integran el dispositivo completo de producción de energía eléctrica para accionar el motor del automóvil, a través de metanol.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Este mecanismo se ha estudiado en los últimos años, con el objetivo de implantarlo en los automóviles de celda de hidrógeno (H₂). Para ello, se requieren sistemas catalíticos que operen a temperaturas suficientemente bajas y que al mismo tiempo sean altamente selectivos. Por ejemplo, con catalizadores de cobre (Cu) o paladio (Pd) con óxido de zinc (ZnO), se han obtenido concentraciones elevadas de hidrógeno (H₂) a la salida del reactor. Sin embargo, siempre están presentes cantidades pequeñas de vapor de agua (H₂O) y monóxido de carbono (CO).

Como ya se ha mencionado, puesto que el monóxido de carbono (CO), es un veneno para los electrocatalizadores de la pila de combustible cuando se encuentra en concentraciones superiores a las 40ppm, los gases a la salida del reactor de oxidación parcial, deben purificarse. Sus opciones de eliminación incluyen la metanación, la oxidación o la separación con membranas, aunque ninguna de ellas ha resultado plenamente satisfactoria. Por ejemplo, en la reacción de metanación, se consumen importantes cantidades de hidrógeno (H₂), necesitando al menos 3 moles de éste, por cada mol de monóxido de carbono (CO). (45)

Una vez analizados los procesos empleados para la producción del hidrógeno (H₂) a partir de hidrocarburos convencionales, se puede observar que para su obtención, se requiere de dichos hidrocarburos, al igual que ocurre con los combustibles convencionales. Por esta razón, ya que el presente estudio busca vectores alternativos frente a dichos combustibles, se van a estudiar a continuación los diferentes mecanismos de generación de hidrógeno (H₂) a partir de tecnologías emergentes, en la cuales se emplean energías renovables en gran parte de ellas.

3.24.3.3.-Obtención del hidrógeno (H₂) mediante procesos térmicos.

En ciertos procesos renovables, se emplea la energía térmica como un medio de producción de dicho elemento. Consiste en un proceso libre de catalizadores, por lo que se

basa en la disociación termoquímica del agua (H₂O) utilizando la energía calorífica de una fuente energética de elevada temperatura. Como claros ejemplos, se pueden encontrar los reactores nucleares o los hornos solares.

Esta energía calorífica, se utiliza en la generación de un conjunto de reacciones químicas en serie, las cuales producen hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂) tras operar a temperaturas que se encuentran por encima de los 950Kº.

Uno de estos procesos sobre el cual se está investigando, se basa en la descomposición de un sulfato metálico. En un primer lugar, la descomposición térmica del presente sulfato, tiene lugar a temperaturas próximas a los 1.100Kº, produciendo óxidos metálicos y gases, tales como el dióxido de azufre (SO₂) y el oxígeno (O₂). A continuación, el óxido metálico es oxidado con vapor de agua (H₂O) y óxido de azufre (SO₂), en el cual puede emplearse el mismo que se ha generado en la etapa anterior, dando de nuevo el propio sulfato junto con una liberación hidrógeno (H₂). En este proceso no se producen emisiones de CO₂ y su eficiencia ronda el 85%. (44)

3.24.3.4.-Obtención del hidrógeno (H₂) a partir de etanol (C₂H₅OH) y azúcares (C₆H₁₂O₆).

Otra manera de generar el hidrógeno (H₂), es a través del etanol (C₂H₅OH) o los azúcares (C₆H₁₂O₆) que se encuentran en fase líquida, debido a que introducen una molécula más compleja que la del metanol (CH₄O) para el proceso de reformado con vapor de agua (H₂O).

Dicho proceso de liberación del hidrógeno (H₂) partir del etanol (C₂H₅OH) o de azúcares (C₆H₁₂O₆), es realizado en presencia de determinados catalizadores, en el interior de reactores que están diseñados para operar bien en fase gaseosa o bien en fase líquida.

Como catalizadores, se están empleando aleaciones metálicas de transición, tales como las de paladio (Pd) con platino (Pt) o níquel (Ni), capaces de catalizar la oxidación selectiva del monóxido de carbono (CO) a dióxido de carbono (CO₂). A través de estos catalizadores, se han consiguiendo resultados significativos, pero a su vez, no logran oxidar en su totalidad el hidrógeno (H₂) a agua (H₂O), por lo que las investigaciones actuales se basan en el empleo de membranas porosas, inorgánicas y poliméricas. Para ello, dichas membranas han de contener una porosidad bien definida, unas dimensiones de poro de décimas nanómetro y una distribución de tamaños de poro muy estrecha. La separación de la corriente gaseosa mediante una de estas membranas, diseñadas para permitir únicamente la circulación de las moléculas de hidrógeno (H₂) pero no las de monóxido de carbono (CO), ni las de (CO₂), se trata de una alternativa bastante óptima a pesar de su complicado diseño. (44)

La principal ventaja de este proceso, es que la materia prima puede considerarse neutra, respecto a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Sin embargo existe la dificultad en dichas reacciones, de no ser completamente selectivas debido a las bajas condiciones de operación, por cual se ven favorecidas otras reacciones laterales que dan lugar a subproductos no deseados. Entre estos subproductos, destacan el monóxido de carbono (CO), el metano (CH₄) y el acetaldehído (C₂H₄O). Además, los catalizadores anteriormente tratados, sufren procesos de desactivación debido a la formación de depósitos de carbonosos, por lo que se dificulta la puesta en práctica de dicha tecnología.

Finalmente, se ha de concluir explicando que el objeto de este proceso reside en el desarrollo de sistemas catalíticos que operen a temperaturas más bajas, con el objetivo de minimizar los procesos de desactivación. Una de estas alternativas son dichas membranas.

3.24.3.5.-Obtención del hidrógeno (H₂) a partir de la electrólisis convencional.

Se trata de uno de los mecanismo de obtención del hidrógeno (H₂) más estudiados a lo largo de la historia, por lo que también ha sido la técnica que mayores debates ha generado, debido a que se trata de uno de los principales temores en la industria de los combustibles fósiles, tales como en la del petróleo.

Básicamente, la electrólisis consiste en la descomposición de la molécula de agua (H₂O) mediante una corriente eléctrica en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂). Para su funcionamiento, se ha de conectar una fuente de energía eléctrica junto a dos electrodos colocados en el interior de un volumen de agua (H₂O), los cuales normalmente se encuentran contruidos de algún metal inerte, tales como el platino (Pt) o el acero inoxidable. En el momento de cerrar el circuito eléctrico, se genera hidrogeno (H₂) en el cátodo y oxigeno (O₂) en el ánodo.

De acuerdo al modelo ideal de la electrólisis, de acuerdo a la molécula de agua (H₂O), la cantidad de hidrogeno (H₂) generada, ha de ser el doble que la cantidad de moles de oxigeno (O₂) y ambas deben ser proporcionales a la carga eléctrica suministrada. Durante este proceso, en el cátodo, se produce una reacción de reducción, mediante la cual los electrones (e⁻) de dicho electrodo son atraídos por los cationes del hidrogeno (H₂) para formar dicho gas. A su vez, en el ánodo, aparece una reacción de oxidación, la cual genera oxigeno (O) en forma de gas, junto con una transmisión de electrones (e⁻), con la que se completa el circuito.

1. **Reacción de reducción en el cátodo:** $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$
2. **Reacción de oxidación en el ánodo:** $2H_2O \rightarrow 4H^+ + 4e^- + O_2$
- **Descomposición del agua:** $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$

De acuerdo a la ecuación de Nernst, ya estudiada anteriormente en el apartado de celdas de combustible poliméricas, se obtiene de manera teórica que el potencial mínimo a necesitar para descomponer la molécula de agua (H₂O) es igual a 1,23V. Por el contrario, en el modelo real de muchas celdas electrolíticas, aparecen reacciones adicionales debidas a sus componentes, lo que genera eficiencias inferiores que en el modelo ideal, dando lugar a un potencial mínimo necesario que ronda los 2,2V. (7)

Tabla 33: Parámetros de la expresión de Nernst.

$E = E^0 + ((RT/2F) \cdot \ln(P_{H_2}/P_{H_2O})) + ((RT/2F) \cdot \ln(P_{O_2}))$	
• Ecuación 25: Expresión de Nernst.	
7.	E, es el potencial ideal de equilibrio, en voltios (V).
8.	E ⁰ , consiste en el potencial ideal estándar, en voltios (V).
9.	R, es la constante del gas a tratar.
10.	T, es la temperatura absoluta con la que se trabaja, en K ^o .

11. F, se trata de la constante de Faraday, con un valor equivalente a 96487 C^o/mol.
12. P, son presiones tanto de los reactivos como de los productos, en atmósferas (atm.)

Este proceso, ha de realizarse en un medio alcalino, ya que en este medio se incrementa la conductividad eléctrica. El hidrógeno (H₂) generado en el electrodo negativo se ha de purificar debido a su elevado contenido en impurezas de oxígeno (O₂) y a su nivel de humedad. El secado por parte de la corriente de hidrógeno (H₂), se realiza mediante un adsorbente unido a un convertidor de óxido, para así poder eliminar las impurezas de oxígeno (O₂).

La mayor parte de los electrolizadores empleados en la actualidad, son de tipo tanque junto con los electrodos instalados en paralelo. El calor generado tras el proceso, ha de ser eliminado mediante la recirculación del agua (H₂O) alrededor de las celdas.

De acuerdo a los cálculos anteriores, el hidrógeno (H₂) producido mediante esta metodología, es del orden de 4,9 a 5,6kWh por cada metro cúbico generado, resultando de un coste más elevado que mediante el reformado por vapor de agua (H₂O). (44)

Recientemente, se ha demostrado la mejora de la electrólisis, al emplear un catalizador compuesto por nano partículas de diámetro ultra pequeño (2-5nm). Éstas, son obtenidas a partir de una serie de nano partículas de 20nm de un óxido de metálico de transición, tal como el hierro (Fe), cobalto (Co), un óxidos de níquel o sus óxidos mixtos, mediante una transformación electroquímica, que resulta de la reacción de conversión de dicho óxido metálico mediante iones de litio (Li) inducidos.

Esta clase de nano partículas de NiFeOx inducidas por iones litio, dan lugar a catalizadores activos que exhiben alta actividad y estabilidad para la división global de la molécula de agua (H₂O) en la base. Mediante esta técnica, se ha logrado romper la molécula de agua con una corriente de 10mA/cm² mediante 1,51 V de tensión, durante más de 200 horas sin degradación alguna, empleando dos electrodos y un mol de hidróxido potásico (KOH).

El presente mecanismo, ha sido desarrollado por Haotian Wang, Hyun-Wook Lee, Yong Deng, Zhiyi Lu, po-Chun, Yayuan Liu, Dingchang Lin y Yi Cui, mediante un estudio denominado "Bifunctional non-noble metal oxide nanoparticle electrocatalysts through lithium-induced conversion for overall water splitting", el cual fue publicado en la revista científica "Nature Communication" en 2015. (46)

3.24.3.6.-Obtención de hidrógeno (H₂), mediante electrólisis en fase de vapor.

Por razón anterior, se han desarrollado otra serie de procesos electrolíticos, entre los que destaca la electrólisis en fase de vapor. Mediante ésta tecnología, el potencial reversible de la celda decrece al incrementarse la temperatura. De acuerdo a que el coste de la electricidad requerida en la electrólisis para producir hidrógeno (H₂) a partir del agua (H₂O) es directamente proporcional a la fuerza electromotriz de la celda, el coste por lo tanto decrecerá con la temperatura.

Por lo tanto, la celda disminuye su temperatura debido a que se trata de un proceso endotérmico y se mantiene a una temperatura constante mediante el aporte de un calor externo. De esta manera, el hidrógeno (H₂) es obtenido a través de la energía calorífica por vía electroquímica, sin pasar por un ciclo de Carnot. Por ejemplo, a temperaturas de 1.500Kº, la cantidad de energía térmica empleada en la descomposición de la molécula de agua (H₂O) posee un valor equivalente a la mitad de su totalidad. Finalmente, mediante este proceso, el coste de producción es un 50% menor que tras el método convencional. (44)

3.24.3.7.-Obtención del hidrógeno (H₂) mediante electrólisis, empleando un catalizador biodegradable basado en enzimas.

Sin embargo, frente a los inconvenientes que presentan los métodos convencionales de extracción del hidrógeno (H₂) a partir de la molécula de agua, recientemente se ha descubierto un catalizador compuesto de un biomaterial, capaz de solventar los inconvenientes que presentaba la electrólisis hasta el momento.

Este catalizador, parte de una encima modificada, la cual es introducida en el interior de la cubierta de una proteína de un virus bacteriano, conocido como "P22-Bacteriófago". De esta manera se logra obtener un material ciento cincuenta veces más eficiente que la enzima inalterada. Mediante la capacidad que proporciona dicho virus a la hora de auto ensamblar innumerables bloques de construcción genética, se ha conseguido incorporar en su interior la correspondiente enzima. Ésta, a pesar de su alto grado de fragilidad y sensibilidad, posee la propiedad de atraer protones y devolver hidrógeno (H₂) con una alta capacidad. (47)

El material genético empleado para la fabricación de la enzima, es generado a partir de dos genes, el "HYA" y el "HYAB" que se encuentran en la bacteria denominada "Escherichia Coli", los cuales son introducidos en el interior la cubierta de dicho virus.

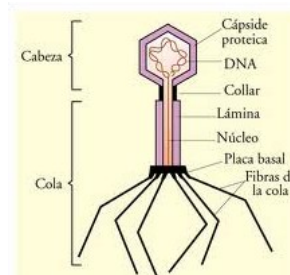
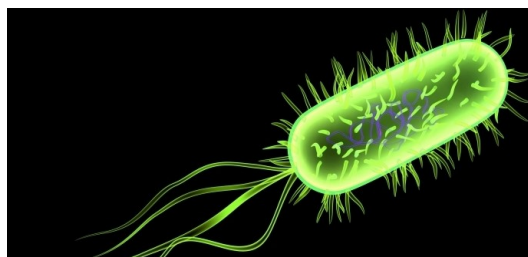


Figura 154: Bacteria de Escherichia Coli.

Figura 155: Virus P22-Bacteriófago.

Fuentes: www.theasiasun.com y www.epidemiologiamolecular.com

El resultado final de este experimento, se trata de una partícula de estructura similar a la de un virus, pero con un comportamiento muy parecido al de un material altamente sofisticado en catalizar la generación del hidrógeno (H₂). A este material se le ha otorgado el nombre de "P22-HYD". (47)

Su obtención es bastante sencilla, ya que se puede generar a través de un proceso de fermentación a escala masiva con temperaturas y presiones ambientales (25°C y 1 atm), por los que es potencialmente menos costoso y más respetuoso con el medio ambiente al producirse, debido a que es biodegradable, en comparación con otros catalizadores comúnmente empleados en celdas electrolíticas.

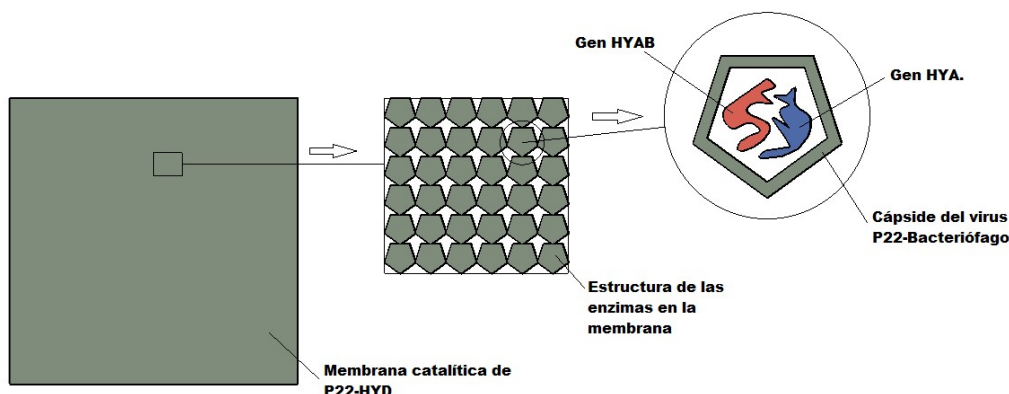


Figura 156: Representación esquemática de una membrana catalítica de P22-HYD.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Además, este material aparte de romper los enlaces químicos de la molécula de agua, también posee la capacidad de realiza la función inversa, por lo que se puede emplear en las pilas de combustible poliméricas estudiadas anteriormente. (47)

El presente descubrimiento fue realizado por Paul C.Jordan, Dustin P.Petterson y Kendall N.Saboda entre otros científicos, mediante un estudio denominado "Self-assembling biomolecular catalysts for hydrogen (H₂) production" y publicado en 2015 en la revista científica Nature Chemistry.

3.24.3.8.-Obtención de hidrógeno (H₂) a partir de la electrólisis de la urea (CON₂H₄).

Otra manera con la cual se ha conseguido obtener dicho gas, es a partir de la orina, un residuo bastante sencillo de obtener, y en grandes cantidades. Se cree que mediante la electrolisis de la orina, se consigue obtener una mayor cantidad de hidrogeno que con los métodos convencionales a través del agua (H₂O). La metodología se basa en la descomposición de la urea mediante una tensión mínima equivalente a los 0,37V, permitiendo recorrer alrededor de 40km mediante el empleo de 1L de urea.

La orina es el principal portador de urea (CON₂H₄), la cual incorpora en su composición cuatro átomos de hidrogeno (H₂) por cada molécula. La electrolisis encargada de romper dichas moléculas, es llevada a cabo mediante un nuevo proceso de bajo coste, compuesto de dos electrodos de níquel (Ni) capaces de oxidar la urea, para así obtener el hidrogeno (H₂) puro en el cátodo.

Sin embargo, mediante esta sustancia, existe un claro inconveniente durante su electrolisis. Se trata de la liberación de sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$) y otras partículas de nitrato, las cuales pueden generar problemas de salud tales como la bronquitis o el asma. A su vez, ciertas bacterias transforman la urea en amonio (NH_4^+), por lo que se reduce la eficiencia del proceso, en el caso de que la orina se haya encontrado sometida durante un largo periodo de tiempo ante la acción bacteriana. Por lo tanto, un grupo de investigación de la Universidad de Ohio (Estados Unidos), promotor de este método, se encuentra actualmente desarrollando una posible solución frente a estas bacterias y así solucionar este inconveniente. (7)

Finalmente, ésta técnica da la opción de obtener energía a partir de determinados desechos, por lo que a su vez serviría de ayuda frente al tratamiento de aguas residuales.

Dicha investigación comenzó mediante un estudio realizado por Bryan K. Boggs, Rebecca L. King y Gerardine G. Botte en 2009 y publicado en la revista científica "Chemical Communications" llevando por nombre "Urea electrolysis: direct hydrogen production from urine." (48)

3.24.3.9.-Obtención del hidrógeno (H_2), a partir de la biomasa.

Otra forma de obtener el hidrógeno (H_2) es a partir de la biomasa celulósica. La celulosa ($C_6H_{10}O_5$) puede convertirse en hidrógeno (H_2) mediante varios procesos termoquímicos tales como la combustión, la licuefacción, la pirolisis o la gasificación.

La celulosa ($C_6H_{10}O_5$), teóricamente posee su punto de oxidación parcial a temperaturas superiores a los $1000K^{\circ}$, por lo que se genera una fracción gaseosa junto con un residuo carbonoso, el cual ha de ser reducido con posterioridad para así formar hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). (44)

Durante la gasificación por parte de la biomasa en presencia de oxígeno (O_2) se genera una corriente gaseosa rica en hidrógeno (H_2), la cual debe reformarse con vapor de agua (H_2O) a la salida del gasificador, con el objeto de producir una mayor cantidad de hidrógeno (H_2) adicional. El principal inconveniente de esta gasificación, consiste en la formación de alquitrán.

A su vez, los residuos pesados polimerizan, dando lugar a estructuras de mayor complejidad que no resultan apropiadas a la hora de generar hidrógeno (H_2) mediante reformado con vapor. La presente formación de alquitrán, puede ser minimizada mediante un diseño apropiado en el gasificador, mediante la incorporación de aditivos catalíticos o también mediante el control de las variables en la operación. Los catalizadores empleados, consiguen reducir el contenido en alquitrán, pero su gran aporte, fundamentalmente consigue optimizar la calidad y la conversión en la fracción gaseosa generada.

Otro problema en el interior de la gasificación de biomasa, es la formación de ceniza, la cual puede producir acumulación, y por consiguiente, obstrucciones y desactivación. Para solventar estos problemas, se ha de aplicar una extracción y un fraccionamiento en las correspondientes corrientes. (44)

Recientemente, en el Instituto de Tecnología de Virginia (Estados Unidos), se ha desarrollado un método basado en enzimas, capaz de descomponer azúcares sin presencia de microorganismos, lo que lo diferencia fundamentalmente de la fermentación. Lo interesante de esta metodología, es su potencialidad a la hora de descomponer restos de cosechas, por ejemplo los de maíz, para generar hidrógeno (H₂).

A pesar de que esta tecnología se encuentra en sus primeras etapas, los ensayos en el laboratorio mediante un reactor a escala milimétrica, han demostrado que se puede generar el triple de hidrógeno (H₂) que mediante los procesos fermentativos, siendo de igual eficiencia que aquellos basados en microorganismos, tales como el etanol celulósico. Los siguientes objetivos de esta tecnología, consisten en poder aplicarse a escala industrial, para así construir estaciones capaces de generar hidrógeno (H₂) mediante este método.

3.24.3.10.-Obtención del hidrógeno (H₂) a partir de sistemas biológicos.

Otra reciente forma de extraer el hidrógeno (H₂), proviene de sistemas biológicos, especialmente a partir de ciertas especies de algas, ya que ciertos microorganismos fotosintéticos poseen la capacidad de realizar la ruptura de una molécula de agua (H₂O) para así generar hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂).

Un claro ejemplo se encuentra en un alga verde denominado "Scenedesmus", el cual es capaz de generar hidrógeno (H₂), bien al ser iluminadas con luz visible o bien cuando se mantienen en condiciones anaerobias y con la ausencia de luz. Analizando su segundo método de producción de hidrógeno (H₂), es decir, mediante la fermentativa en condiciones anaerobias empleando almidón como fuente reductora, se observa que la generación se mantiene estable, debido a la ausencia del oxígeno (O₂). Sin embargo, de esta manera la velocidad de producción de dicho gas por unidad de peso, es de menor valor que la obtenida mediante irradiación con luz. (44)

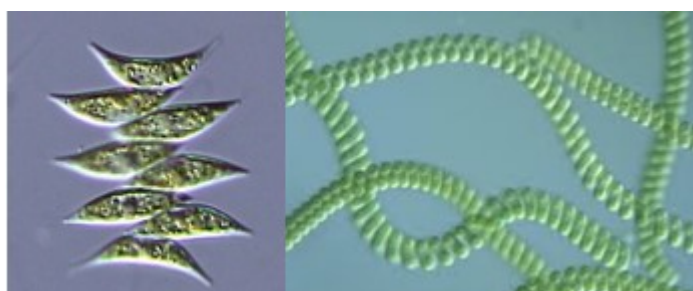


Figura 157: Muestra de un alga "Scenedesmus" a la izquierda y de un alga "Spirulina" a la derecha.

Fuente: www.commonswikimedia.org

Otro de los organismos biológicos a tener en cuenta son las cianobacterias, las cuales también son capaces de obtener hidrógeno (H₂) mediante procesos de fermentación en ausencia de luz y en condiciones anaerobias. Entre los diferentes tipos de cianobacterias descubiertas y ensayadas hasta el momento, la especie que presenta una actividad de producción más elevada, es la denominada "Spirulina". (44)

Por lo tanto, la obtención del hidrógeno (H₂) mediante los diferentes sistemas biológicos, representa uno de los campos de mayor estudio e investigación dentro del ámbito de la biotecnología, en relación con los problemas ambientales. Esto es debido a que los organismos biológicos se tratan al fin y al cabo, de importantes mecanismos a tener en cuenta por parte del mundo ingenieril, sobre los cuales se ha de estudiar, para así poder optimizar las tecnologías creadas por el ser humano.

Actualmente, el rendimiento en la conversión de la energía solar en energía química mediante sistemas biológicos, es aún bastante baja, lo que por el contrario puede ser compensado debido a sus reducidos costes de inversión, a la hora de poner en práctica dicha metodología. A su vez, diferentes investigaciones realizadas a escala de laboratorio, han mostrado que pueden obtenerse eficiencias mayores en la generación del hidrógeno (H₂) mediante sistemas foto-heterotróficos. Las investigaciones más recientes por parte de organismos científicos especializados en la fotosíntesis artificial, se encuentran investigando y realizando numerosos estudios acerca de mecanismos que puedan reproducir dicho proceso, obteniendo resultados bastante prometedores. Dichas investigaciones poseen la finalidad de incrementar la producción de dicho gas en los campos de generación y así dar lugar a importantes superficies para su producción masiva.

Un claro ejemplo, se encuentra en la Universidad del Estado de Florida, donde han descubierto un método, el cual emplea un óxido de manganeso, también conocido como Birnessita, para simular la fotosíntesis. De esta manera, se consigue capturar la luz del sol y luego usar esa energía solar para crear una reacción de oxidación, descomponiendo de agua (H₂O) en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂).

Según los investigadores, una única capa del dicho material, ofrece lo que se denomina una brecha de banda directa, mientras que por el contrario, múltiples capas constituyen un espacio de banda indirecta. La brecha de banda, se denomina directa si el impulso entre los electrones y los poros del material es el mismo tanto en la banda de conducción, como en la banda de valencia, por lo que un electrón puede emitir directamente un fotón. Es decir, el electrón no cambia su momento al pasar de la banda de valencia a la banda de conducción, por lo que al regresar a la banda de valencia, el electrón devuelve su energía de excitación y emite un fotón.

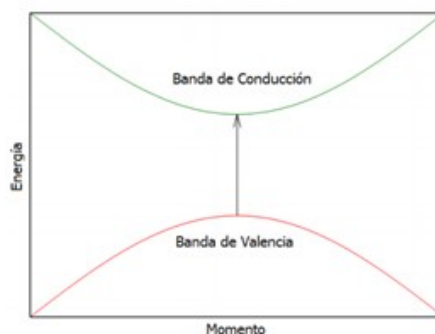


Figura 158: Gráfica de energía contra momento para un semiconductor con banda prohibida directa.

Fuente: www.tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/23097/Capitulo2.pdf

A su vez, se ha de conocer que la luz solar penetra en diferentes tipos de materiales de una manera diferente, pero su energía sólo es capturada y almacenada de forma eficaz mediante los materiales que poseen brecha de banda directa. Lo que es notable sobre dicha investigación, es la elevada capacidad de captación de la energía cuando sólo hay una única capa del respectivo material, por lo que los costes de producción se ven reducidos, frente al empleo de varias capas. (49)

Dicha investigación ha sido dirigida por Kevin P. Lucht, junto con Jose L. Mendoza Cortés y publicada en el año 2015 en la revista científica "The Journal of Physical Chemistry" con el nombre de "Birnessite: A Layered Manganese Oxide To Capture Sunlight for Water-Splitting Catalysis".

3.24.3.11.-Producción del hidrógeno (H₂) a partir de la energía solar.

Otro mecanismo a tener en cuenta a la hora de producir el hidrógeno (H₂), es la disociación de la molécula de agua (H₂O) sobre semiconductores, mediante el empleo de la luz solar. La eficiencia de dicho proceso viene determinada fundamentalmente por las propiedades foto-físicas y la morfología del material semiconductor, el cual es empleado. (7)

A la hora de llevar a cabo la comercialización de este proceso para la producción de hidrógeno (H₂) mediante la energía contenida en los fotones del espectro visible, se requieren importantes desarrollos en dicha tecnología, para así conseguir fotocatalizadores activos y estables en la reacción de disociación. Un claro ejemplo de esta clase de catalizadores, son los compuestos de cristales fotónicos tridimensionales de óxido de titanio (TiO₂), junto con nanopartículas de oro (Au) de 2 a 3 nanómetros. Determinadas etapas, tales como la transferencia de carga entre el semiconductor y el fotocatalizador, junto con la dependencia de factores estructurales y electrónicos en dicha interface, permanecen en etapa desarrollo y estudio a día de hoy.

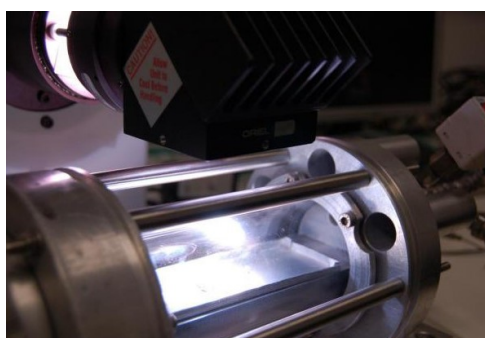


Figura 159: Obtención de hidrógeno (H₂) a través de energía solar.

Fuente: www.proyectohumano.argentinaforo.net

Actualmente, la posibilidad de controlar la morfología del foto-catalizador en una escala nano-métrica a través de los diferentes procesos de fabricación innovadores, se trata de una entre las varias opciones existentes que permite modular su morfología y su reactividad.

Esto se debe a que el presente mecanismo posibilita importantes desarrollos sobre los fotocatalizadores empleados en la actualidad, capaces de realizar la disociación fotoquímica del agua. (44)

Entre los avances más recientes dentro de la obtención de hidrógeno (H₂) a partir de la energía solar, se encuentra la de llevar a cabo el proceso en la misma célula fotovoltaica, tal y como se explicó en el apartado anterior, mediante la fotosíntesis artificial. De esta manera, la separación de la molécula de agua (H₂O) se produce en el mismo dispositivo, el cual genera los electrones (e⁻) necesarios para dicho proceso. El principal inconveniente que tiene lugar en este proceso es la oxidación de sus materiales, por lo que para evitarlo, se han de recubrir los componentes de silicio (Si) con una capa de níquel (Ni). Tras numerosos ensayos por parte de un grupo de científicos de la Universidad de Stanford, se ha verificado que de esta manera no existe oxidación alguna. Para que este tipo de fotosíntesis artificial sea realmente efectiva en la producción de hidrógeno (H₂) a gran escala, numerosos grupos científicos se encuentran investigando sobre la manera de aumentar la vida útil en esta clase de células fotovoltaicas, encargadas de producir la electrólisis.

El éxito en el campo de la fotosíntesis artificial, normalmente significa lograr una eficiencia energética de por encima de 10% y a día de hoy, se ha logrado aumentar su rendimiento hasta un 22,4%, mediante el empleo de níquel (Ni) como catalizador. Esto es importante porque además se evita el uso de metales preciosos, mientras que el níquel (Ni) posee un bajo coste, siendo abundante y de gran estabilidad al ser empleado en la celda electrolítica. (50)

Dicho descubrimiento fue realizado por Shannon A. Bonke, Mathias Wiechen, Douglas R. MacFarlane y Leone Spiccia (investigadores de la Universidad de Monash en Melbourne), a través de un estudio denominado "Renewable fuels from concentrated solar power: towards practical artificial photosynthesis", es cual ha sido publicado en la revista científica "Energy and Environmental Science", en el año 2015.

3.24.3.12.-Obtención del hidrógeno (H₂) a través de residuos plásticos.

En estos últimos meses, en la Universidad de País Vasco (IPV/EHU), se han obtenido importantes resultados tras un proceso de dos etapas, para la obtención de hidrógeno (H₂) a partir de plásticos residuales. Esto se debe a que los polímeros son grandes fuentes para la obtención de dicho gas, mediante el tratamiento de los gases obtenidos tras su pirolisis a través de un reformado catalítico con vapor. (51)

En la primera etapa de esta metodología, se ha de someter a los plásticos a un proceso de pirolisis en ausencia de oxígeno (O₂), a través de un reactor cónico de lecho en surtidor, en el cual se producen importantes transferencias de energía calorífica y de masa, producto de los movimientos cíclicos en su interior.

Los gases resultantes tras esta primera etapa, son conducidos a hacia un proceso de reformado con vapor de agua (H₂O), en el cual se encuentra el catalizador, para así poder dar lugar a la generación del hidrógeno (H₂). Durante los ensayos a escala de laboratorio, se han

empleado diversas condiciones de operación, para poder estudiar su influencia en la producción del hidrógeno (H₂). A su vez, también se han analizado las diversas causas por las cuales el catalizador se desactiva a lo largo de su uso, junto con los diferentes tipos de plásticos que se encuentran entre los residuos sólidos urbanos, para así obtener el potencial que puede tener cada uno de ellos, a la hora de obtener hidrógeno (H₂).

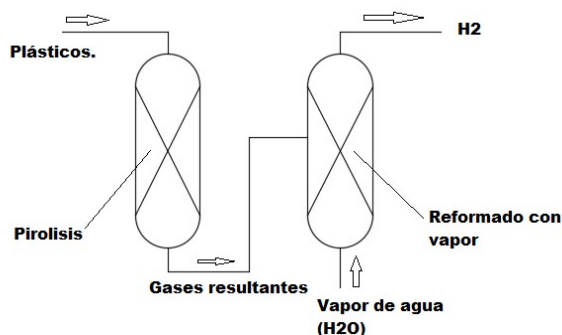


Figura 160: Esquema general de la producción de hidrógeno (H₂) mediante residuos de plásticos.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Tras los resultados de estas investigaciones, se ha concluido que el proceso a través de dos etapas, es más eficiente que mediante el empleo de una única etapa, ya que de esta manera se obtiene una mayor cantidad de hidrógeno (H₂). Su principal inconveniente a día de hoy, es su alto coste de producción, debido al empleo de dos reactores, ya que se trabaja a elevadas temperaturas, por lo que aún este sistema necesita de un importante desarrollo. Los catalizadores que admite este mecanismo, son similares a los usados en el resto de métodos de generación, ya estudiados. (51)

A pesar de que consiste en una tecnología muy reciente, puede tratarse de una pieza muy importante en la red de generación de hidrógeno (H₂) a nivel industrial, debido a que además de generar dicho producto, es capaz de reciclar gran cantidad de residuos plásticos, por lo que su desarrollo jugará un importante papel en las próximas décadas.

La presente investigación ha sido realizada por Itsaso Barbarias (investigadora del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la UPV/EHU) a través de un estudio denominado "Hidrógeno (H₂) a partir de residuos plásticos" y publicado a partir de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) en el 2016. (51)

3.24.3.13.-Obtención del hidrógeno (H₂) a partir de la energía eólica.

Debido a que otra de las fuentes de mayor contaminación medioambiental es la generación de electricidad, ya que gran parte de esta es generada mediante recursos fósiles contaminantes, se emplean cada vez más las energías renovables, tales como la eólica.

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, este tipo de energía renovable también tiene sus inconvenientes, como puede ser la eficiencia y por lo tanto, su rentabilidad. La generación de

electricidad mediante recurso eólico depende de la velocidad del viento, con lo cual no se genera electricidad para una velocidad demasiado baja del viento, ni para otra demasiado alta.

Una alternativa, consiste en la producción de hidrógeno (H₂) gracias a la electricidad sobrante de los parques eólicos. De esta manera se logra proporcionar un uso a esa energía sobrante, para así emplear dicho hidrógeno (H₂) en otras aplicaciones, tales como en el automovilismo, o para generar electricidad cuando la demanda en la red lo así exija. Es decir, las deficiencias de la energía eólica, se lograrían compensar con el uso del hidrógeno (H₂) en los periodos de no generación por parte del parque.

A su vez, el problema de la generación de hidrógeno (H₂) por electrólisis, que es la gran cantidad de energía que consume, se resuelve con el uso de la energía eléctrica sobrante producida por los parques eólicos, que de otra forma se perdería.

Por tanto, mediante la unión del hidrógeno (H₂) y la energía eólica, entre otras fuentes renovables, se consigue una energía carente de emisiones y con una alta eficiencia, la cual resolvería en una gran proporción la dependencia existente frente a los combustibles fósiles.

Para la producción de dicho combustible, la energía eléctrica sobrante o que se quiera almacenar se lleva hacia un electrolizador, en el cual, mediante el paso de la energía eléctrica, disocia el agua en sus dos partes, el hidrógeno (H₂) y el oxígeno (O₂). Tras esta disociación, el hidrógeno (H₂) es comprimido para un mayor almacenamiento, ya que exige un volumen menor, mientras que el oxígeno es liberado a la atmósfera. (52)

Varias compañías tales como "The Energy Innovations Company", han apostado por este tipo de mecanismo, debido a la serie de ventajas que presenta. (52)

Una vez analizadas las diferentes vías a través de las cuales se puede generar el hidrógeno (H₂), se puede observar que pese a que la gran mayoría se encuentran a día de hoy en procesos de desarrollo a escala de laboratorio, existe una base de elevada importancia, la cual da pie a la generación de una red de producción de dicho elemento a escala industrial. A su vez, también se ha de destacar la velocidad a la que se encuentran en desarrollo dichos mecanismos, los cuales se van optimizando progresivamente con la búsqueda de nuevos materiales y la evolución tecnológica. Por otro lado, la vía seleccionada de producción del hidrógeno (H₂), se encuentra determinada por economía del proceso, las necesidades del mercado y también por las regulaciones ambientales. Este combustible, permite el acceso hacia un amplio grupo de precursores primarios tales como lo son los combustibles fósiles, la energía nuclear y sobre todo, con una penetración cada vez mayor, las energías renovables. Mediante todas estas alternativas, el coste del hidrógeno como vector energético no contaminante, será más estable en las próximas décadas que cualquier otra fuente de energía, especialmente en el mundo del automóvil. Esto se debe a que la introducción del hidrógeno (H₂) y la electricidad como portadores de energía, permiten explotar los recursos autóctonos y así reducir la dependencia actual de los combustibles convencionales.

3.24.4.-El transporte del hidrógeno (H₂).

Pera el transporte de esta sustancia, se emplean depósitos con capacidades de alrededor de los 300kg, a presiones de 200 bares, cuando se trate de suministrar bajas demandas. (7)

Sin embargo, cuando existe un aumento sobre su demanda, este sistema de distribución es insuficiente, por lo que se han de emplear depósitos de hidrógeno (H₂) en estado líquido, los cuales aumentan su capacidad hasta los de 3000kg. El transporte de estos depósitos se realiza bien mediante camiones, ferrocarril o por transporte marítimo. Los contendedores han de estar aislados mediante una doble capa, para así evitar los posibles problemas de vaporización. En algunos tanques, se emplea nitrógeno (N) líquido a su alrededor, para así poder reducir la transferencia de calor hacia el interior del tanque. Mediante este método, la cantidad de hidrogeno (H₂) vaporizado en este tipo de depósitos, suele estar entre un 0,3 y un 0,6% de su contenido total.



Figura 161: Transporte de hidrógeno (H₂) mediante camiones con depósitos.

Fuente: www.cocheshidrogeno.es

Actualmente, el hidrogeno (H₂) es transportado en estado líquido debido a que resulta más rentable que en estado gaseoso. Esto se debe a que en un camión cisterna, se logra almacenaren dicho estado, el equivalente a unos 30 camiones que transporten hidrogeno (H₂) en estado gaseoso a elevadas presiones. Una vez transportado, el hidrogeno se transforma a su estado gaseoso en la planta donde vaya a ser empleado. Los convertidores de hidrógeno (H₂), poseen una capacidad típica que ronda los 3.000 m³ cada hora.

Finalmente, la opción que saldría más rentable a largo plazo, junto con la expansión de las centrales generadoras de hidrógeno (H₂) explicadas en el apartado anterior, sería la implantación de una red de suministro de tuberías de hidrógeno (H₂). En algunos lugares tales como en Estados Unidos, en Canadá y en varios países de Europa, ya existen esta tipo de redes de tuberías. Las presiones de funcionamiento más comunes son de 1 a 3MPa, junto con caudales que alcanzan los 8.900kg en cada unidad horaria. Esta serie de conductos son similares a las empleadas actualmente durante la distribución de gas natural, con ciertas variaciones de algunos de sus parámetros, tales como su diámetro, su nivel de presión, las

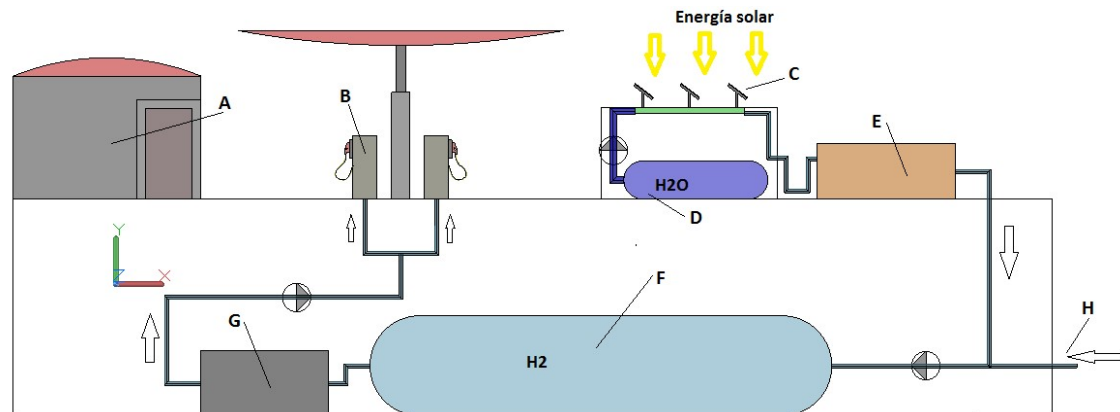
distancias entre las estaciones de compresión, o el material de fabricación. (33) Estas variaciones se deben a las propiedades tanto físicas como químicas que ofrece dicho combustible en estado gaseoso.

3.24.5.-Estaciones de suministro del hidrógeno (H₂).

Las hidrogeneras, son las estaciones de servicio empleadas y preparadas para suministrar de este combustible a los vehículos que trabajan con hidrógeno (H₂). A diferencia de las estaciones de servicio de combustibles convencionales, en las cuales estos son almacenados una vez que hayan sido transportados mediante camiones cisterna, en las hidrogeneras la fuente de hidrógeno (H₂) puede ser variada. Es decir, éste puede ser suministrado en estado líquido mediante depósito sobre los camiones, directamente por tuberías de hidrógeno en estado gaseoso o incluso puede ser producido directamente en la misma estación, a través de sus diferentes métodos de producción. (7)

A continuación se muestran los diferentes componentes que forman este tipo de estaciones de servicio.

- a) Depósitos de almacenamiento con los que poder almacenar el hidrógeno (H₂) en estado líquido o gaseoso.
- b) Un sistema de purificación capaz de tratar dicho combustible y así lograr las especificaciones requeridas por los vehículos que trabajan con hidrógeno (H₂).
- c) Un compresor que minimice el volumen de su almacenamiento y lo prepare a la hora de bombearlo a elevadas presiones, las cuales normalmente alcanzan los 35MPa (a una densidad de 24,03g/l), hacia los tanques de almacenamiento en el interior de los automóviles.
- d) Equipos de generación de hidrógeno (H₂), en el caso de que la estación de repostaje lo requiera.
- e) Un sistema de seguridad, compuesto por válvulas de alivio de presión, un conducto de respiración y sensores de hidrógeno (H₂).
- f) Un equipo mecánico, compuesto por las válvulas, los inyectores, las bombas y los sistemas subterráneos de conductos.
- g) Un equipo electrónico capaz de realizar el control de la estación.



A	Unidad de control de la estación.
B	Unidad de suministro de hidrógeno (H₂) hacia el vehículo.
C	Unidad de generación de hidrógeno (H₂).
D	Depósito de la fuente de hidrógeno (H₂).
E	Unidad de purificación del hidrógeno (H₂).
F	Depósito de almacenamiento de hidrógeno (H₂).
G	Compresor del hidrógeno (H₂).
H	Unidad de entrada del hidrógeno (H₂) a través de la red de distribución.

Figura 162: Esquema de una estación de suministro de hidrógeno (H₂).

Fuente: La figura anterior ha sido realizada por el autor del presente estudio.

La viabilidad en esta clase de estaciones de suministro, va sujeta a la creación de una red de suministro de hidrógeno (H₂) a grandes escalas, por lo que su implantación a día de hoy resulta de un elevado coste. Sin embargo, debido al importante crecimiento que está experimentando este sector a través de la aparición de los diferentes métodos de producción, analizados en el apartado anterior, se podría establecer en las próximas décadas un coste bastante menor, junto con una elevada capacidad de competencia, frente a las estaciones de suministro empleadas por los combustibles convencionales. Es por esta razón, que numerosos países a lo largo del planeta, se encuentran invirtiendo importantes cantidades de capital sobre dicha red de suministro de hidrógeno (H₂).

CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN DE LA COMPARATIVA.

ÍNDICE:

4.-DESCRIPCIÓN DE LA COMPARATIVA.	249
4.1-Programas empleados.	249
4.2.-Cálculo de los elementos del vehículo de celda de hidrógeno (H ₂).	252
4.2.1.-Dimensiones del vehículo.	252
4.2.2.-Pila de combustible.	254
4.2.3.-Depósitos de almacenamiento del hidrógeno (H ₂).	269
4.2.4-Compresores.	272
4.2.5.-Conductos de gases.	275
4.2.6.-Toma del oxidante (O ₂).	276
4.2.7.-Unidad electrónica de control (CPU).	279
4.2.8.-Sistema de almacenamiento energético (baterías).	280
4.2.9-Motor eléctrico.	282
4.2.10.-Sistema de ruedas.	283
4.2.11.-Sistema de escape.	284
4.2.12.-Componentes adicionales.	286
4.3.-Simulación mediante "Advisor Advanced Vehicle Simulator".	286
4.4.-Vehículos a gasolina.	298
4.5.-Vehículos de gasóleo.	298
4.6.-Vehículos de GLP.	301
4.7.-Vehículos híbridos.	304

4.-DESCRIPCIÓN DE LA COMPARATIVA.

Una vez estudiados y analizados los diferentes mecanismos empleados en la actualidad a la hora de propulsar un automóvil, se procederá a realizar una comparativa entre un vehículo de celda de hidrógeno (H₂) frente a una serie de vehículos convencionales. La finalidad de esta comparativa es el cálculo de las propiedades y comportamientos de dicho vehículo da gama media, basado en una celda de combustible, para así obtener sus ventajas e inconvenientes y poder establecer posibles vectores de mejora en sus desventajas.

Para llevar a cabo dicho procedimiento, en un primer lugar se modelará un automóvil de pila de hidrógeno (H₂) de dimensiones similares a las de un vehículo convencional de gama media, debido que son éstos son los de mayor empleo a día de hoy.

A continuación, se realizarán los cálculos de los principales componentes que forman el automóvil, para proceder a una serie de simulaciones a través de un sistema computacional. Mediante estas simulaciones, se obtendrá de manera aproximada el comportamiento del vehículo modelado en cuanto a consumos, emisiones o potencias entre otros parámetros.

Una vez finalizado el procedimiento anterior, se compararán los resultados obtenidos con una serie de vehículos, los cuales trabajan con diferentes combustibles convencionales, por lo que presentarán distintas propiedades. Para la obtención de los parámetros de éstos vehículos, se emplearán simulaciones similares a modelos que actualmente se encuentren disponibles en el mercado, los cuales son empleados en grandes masas. Los vehículos a tratar, estarán compuestos por un primer sistema de combustión interna de ignición por chispa, por un segundo sistema de combustión interna de ignición por compresión y por un tercer sistema híbrido, ya que se tratan de los tres mecanismos de mayor empleo a día de hoy que operan con los combustibles convencionales.

Finalmente, se concluirá el apartado de dicha metodología mediante una comparación entre hidrógeno (H₂) y el resto de combustibles, a partir de toda la información obtenida y recogida tras el presente estudio.

4.1-Programas empleados.

A la hora de llevar a cabo la presente metodología, se van a emplear una serie de programas de índole computacional, los cuales optimizarán y agilizarán el procedimiento. Los siguientes párrafos describen un breve resumen de cada uno de estos programas:

a).-Auto CAD.

Se trata de un software de diseño asistido por ordenador, el cual es empleado en dibujo 2D y modelado 3D. Siendo desarrollado y comercializado por la empresa Autodesk, consiste en un software reconocido a nivel internacional, debido a sus amplias capacidades de edición, las cuales hacen posible el dibujo digital de planos o la recreación de imágenes en 3D. Por estas razones es uno de los programas más empleados por la comunidad ingenieril.



Figura 163: Auto CAD 3D 2016.

Fuente: www.autodesk.es

La versión empleada para el presente estudio, ha sido “Auto CAD 3D 2016”, mediante la cual se han modelado diferentes elementos, tales como el vehículo de celda de hidrógeno (H₂) con sus respectivos componentes empleados en la metodología (los diversos modelados de dicho vehículo realizados, se recogen en el apartado de “anexos”) y otra figuras mostradas anteriormente, con la finalidad de optimizar la explicación.

b).-Matlab.

Se trata de un entorno computacional integrado, capaz de desarrollar diversas aplicaciones que permiten llevar a cabo trabajos en los cuales se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos, junto con la visualización gráfica de los mismos. Para ello, dicho programa integra análisis numérico, cálculos matriciales y visualizaciones gráficas en un entorno completo, con la finalidad de ofrecer al usuario importantes resultados.

A su vez, dispone de un amplio abanico de aplicaciones de apoyo especializadas, capaces de extender significativamente el número de funciones incorporadas en el programa principal. Dichas aplicaciones cubren en la actualidad prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería a través de la simulación.

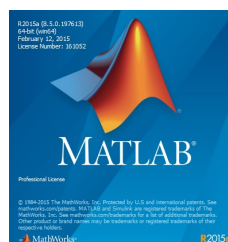


Figura 164: Matlab.

Fuente: www.mathworks.com

En el presente estudio, Matlab ofrece la posibilidad de simular el comportamiento del vehículo de celda de combustible, a través de una aplicación denominada “Advisor Advanced Vehicle Simulator”, la cual es presentada a continuación.

c).-Advisor Advanced Vehicle Simulator.

Consiste en una herramienta, desarrollada originalmente por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL), la cual permite a los usuarios simular y analizar diferentes componentes de vehículos convencionales, tanto avanzados, como ligeros o pesados, incluyendo los vehículos de pila de combustible, los eléctricos e incluso los híbridos. De esta manera se permite a los usuarios evaluar el efecto en los cambios sobre los diferentes componentes del vehículo y otras modificaciones que podrían afectar a la economía de combustible, el rendimiento o a las emisiones.



Figura 165: Advisor Advanced Vehicle Simulator.

Fuente: Obtenida del programa Advisor Advanced Vehicle Simulator.

A partir de esta aplicación se realizarán las simulaciones de manera aproximada, sobre el automóvil anteriormente diseñado y modelado con Auto CAD.

d).-Microsoft Excel.

Se trata de un programa informático desarrollado y distribuido por Microsoft Corp, el cual ofrece al usuario realizar diferentes cálculos matemáticos gracias a sus funciones, desarrolladas específicamente para ayudar a crear y trabajar con hojas de cálculo.



Figura 166: Microsoft Excel.

Fuente: www.microsoftstore.com

Mediante este programa, se llevarán a cabo parte de los cálculos a realizar en alguno de los componentes del vehículo, tales como en la pila de combustible.

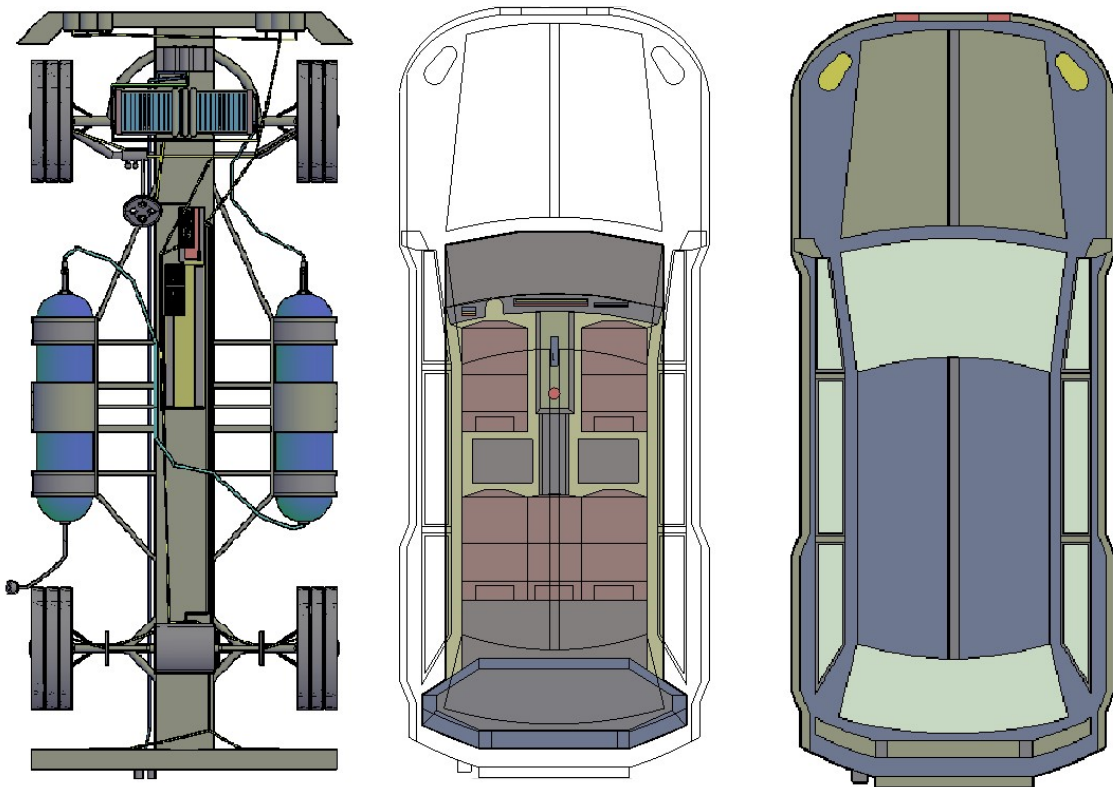
4.2.-Cálculo de los elementos del vehículo de celda de hidrógeno (H₂).

A continuación se va a exponer el procedimiento empleado, junto con los resultados obtenidos tras el diseño de un modelo de coche de celda de hidrógeno (H₂), empleado para realizar la comparativa con una serie de vehículos convencionales.

4.2.1.-Dimensiones del vehículo.

El vehículo a diseñar, ha de poseer unas dimensiones equivalentes a las de cualquier automóvil estándar, debido a que éstos son los de mayor empleo en la sociedad. Para el modelo a diseñar, se han empleado dimensiones similares a las de un automóvil modelo Ford Focus, debido a que dichas dimensiones nos las ofrece el simulador de Matlab. Dichas dimensiones, tomadas de la ficha técnica de este modelo, se muestran en la siguiente tabla (Únicamente se han tomado dimensiones, por lo que no se ha empleado su diseño).

En la siguientes figuras se observa el vehículo modelado en Auto CAD 3D, el cual es desglosado con mayor claridad en el apartado de "anexos" del presente estudio.



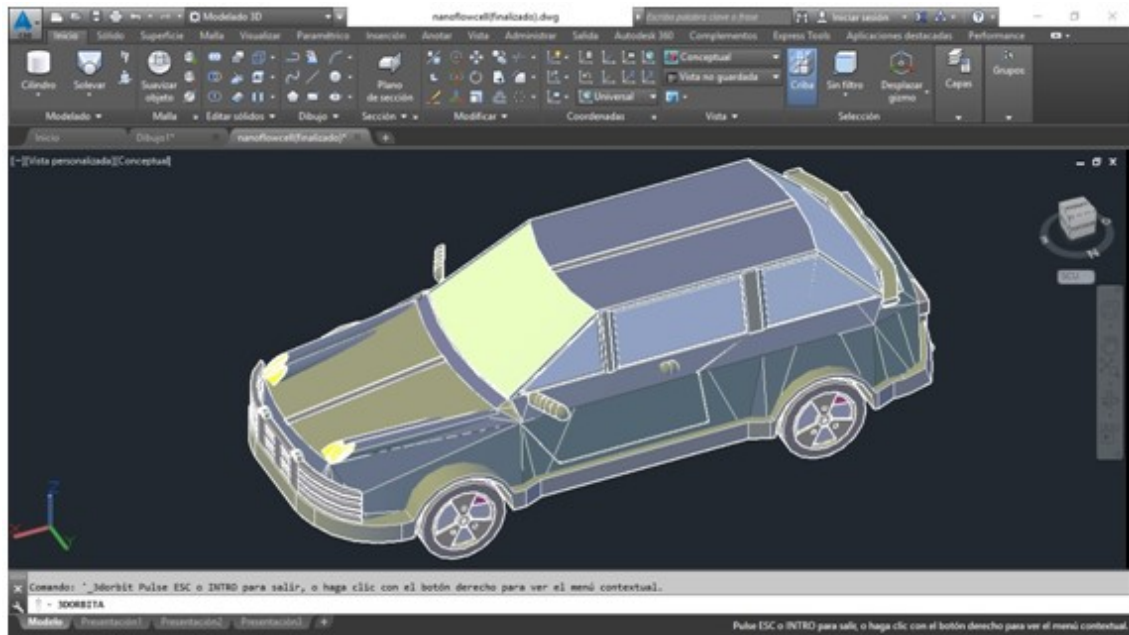


Figura 167: Modelo en Auto CAD 3D del vehículo de pila de hidrógeno (H₂).

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Tabla 34: Dimensiones del vehículo modelado.

Longitud, en metros (m).	4,358
Anchura (Sin tener en cuenta los retrovisores), en metros (m).	1,823
Altura, en metros (m).	1,469
Longitud entre los ejes de las ruedas (m).	2,716
Longitud del capó delantero (m).	1,290
Longitud del capó trasero (m).	0,451
Diámetro de las ruedas (m).	0,58
Dimensión de las llantas (pulgadas).	16,00
Longitud de los depósitos (m).	1,180
Radio de los depósitos (m).	0,140
Masa de la pila de combustible (kg).	298
Masa del sistema de almacenamiento energético (kg).	28
Masa del motor eléctrico (kg).	91
Masa total del vehículo, con carga incluida (kg).	1288

NOTA: Las masas son calculadas por el simulador de acuerdo a los elementos empleados.

De acuerdo a los parámetros obtenidos, se procede a la modelación en Auto CAD del vehículo de celda de hidrógeno (H₂). En la figura realizada, ya que se trata de un elemento ideal a tomar de guía para realizar la comparativa, se ha profundizado principalmente en los

elementos genéricos que conforman un sistema de propulsión de vehículos de celda de combustible. Los elementos que componen el modelo se especifican a continuación y se irán detallando con mayor profundidad en los siguientes apartados.

Tabla 35: Componentes del vehículo modelado.

Pila de combustible polimérica (PEM).
Dos depósitos de almacenamiento de hidrógeno (H ₂) de alta presión en estado gaseoso a 70MP.
Motor eléctrico.
Sistema de almacenamiento energético de Ión Litio (Li).
Sistema de control electrónico (CPU).
Toma delantera de aire oxidante (O ₂).
Inyectores electrónicos para las entradas y las salidas del oxígeno (O ₂) y el hidrógeno (H ₂).
Ruedas con dispositivo regenerador de fricción (Uno por cada rueda).
Sistema de alumbrado eléctrico del vehículo (Al igual que en el resto de los vehículos de rango similar).
Conductos de entrada del oxígeno (O ₂).
Conductos de entrada del hidrógeno (H ₂).
Sistema de escape del agua (H ₂ O) líquida resultante tras la reacción.
Sistema eléctrico (Similar al de cualquier vehículo convencional).
Número de plazas igual a 4 con posibilidad de 5.

En los siguientes apartados se muestran los parámetros empleados para cada uno de los componentes nombrados anteriormente. Los elementos empleados han sido escogidos de acuerdo a la información ya tratada en el "estado del arte".

4.2.2.-Pila de combustible.

Para el cálculo de la pila de combustible, en un primer lugar se ha de calcular el potencial (V) ofrecido por cada una de las celdas que forman la pila de hidrógeno (H₂), para posteriormente continuar con el resto de parámetro de dicha pila. La obtención del potencial (V) necesario a calcular, será realizado a partir del procedimiento mostrado en el apartado de celdas de combustible poliméricas del "estado del arte".

A la hora de definir el comportamiento ideal de una celda de combustible polimérica, se puede emplear la ecuación de Nernst, la cual permite expresar la tensión (V) generado por la celda. Dicha relación proporciona una relación entre el potencial ideal estándar (E⁰) para la reacción de la celda y entre el potencial ideal de equilibrio (E), a diferentes temperaturas y presiones parciales de productos y reactivos.

Potencial ideal en una celda de hidrógeno (H₂).

Tabla 36: Parámetros de la expresión de Nernst.

$E = E^0 + ((RT/2F) * \ln(P_{H_2}/P_{H_2O})) + ((RT/2F) * \ln(P_{O_2}))$

• Ecuación 26: Expresión de Nernst.
1. E, es el potencial ideal de equilibrio, en voltios (V). 2. E°, consiste en el potencial ideal estándar, en voltios (V). 3. R, es la constante del gas a tratar. 4. T, es la temperatura absoluta con la que se trabaja, en K°. 5. F, se trata de la constate de Faraday, con un valor equivalente a 96487 C°/mol. 6. P, son presiones tanto de los reactivos como de los productos, en atmósferas (atm.)

El potencial ideal estándar (E°), expresa un valor para condiciones estándar de 1 atmósfera a 298 K°. Tras conocer el potencial ideal estándar (E°), el potencial ideal puede ser obtenido mediante la ecuación anterior, para diferentes valores de presión y temperatura.

Como se puede observar, el potencial ideal a una determinada temperatura, puede ser incrementado tras elevar las presiones en los reactivos, por lo que a su vez, su eficiencia se ve incrementada.

Sin embargo, para poder emplear esta ecuación, se debe de calcular con anterioridad el potencial ideal estándar (E°). El cálculo del potencial máximo del proceso electroquímico en una pila de combustible, conlleva evaluar las diferencias energéticas entre el estado inicial de los reactivos durante el proceso, es decir, el hidrógeno (H₂) y el oxígeno (1/2O₂), junto con el del agua (H₂O) como producto. Esta evaluación, depende de una serie de funciones termodinámicas de estado, en un proceso químico. Se trata principalmente de la energía libre de Gibbs.

El cambio de energía libre de Gibbs en una reacción electroquímica de una celda de combustible operando a temperatura y presión constante, se puede obtener por la siguiente expresión. Esta energía obtenida es equivalente al trabajo eléctrico generado en una celda de combustible polimérica (PEMFC).

Tabla 37: Parámetros de la energía libre de Gibbs.

$W_{el} = \sum G = -n \cdot F \cdot E_{celda}$
• Ecuación 27: Energía libre de Gibbs.
1. n, es el número de electrones (e⁻) participantes en la reacción. 2. F, se trata de la constante de Faraday, con un valor equivalente a 96487 C°/mol. 3. E_{celda}, consiste en el potencial ideal de dicha celda, en voltios (V). 4. W_{el}, es el trabajo máximo eléctrico de la celda, en julios (J).

Por lo tanto, si se considera que tanto los reactivos como los productos están en sus estados estándar, la variación de energía anterior queda considerada por la expresión mostrada a continuación.

Tabla 38: Parámetros de la energía libre de Gibbs estándar.

$W^{\circ}_{el} = \sum G^{\circ} = -n \cdot F \cdot E^{\circ}_{celda}$

- **Ecuación 28:** Energía libre de Gibbs estándar.

1. **n**, es el número de electrones (e⁻) participantes en la reacción.
2. **F**, se trata de la constante de, con un valor equivalente a 96487 C^o/mol.
3. **E^o_{celda}**, consiste en el potencial ideal estándar de dicha celda, en voltios (V).
4. **W_{el}**, es el trabajo máximo eléctrico estándar de la celda, en julios (J).

La reacción de una celda de combustible polimérica, puede emplearse tanto para generar corriente eléctrica como energía calorífica, por lo cual, el máximo trabajo disponible en una fuente de combustible, se encuentra ligado a la energía libre de la reacción. A su vez, la cantidad entalpía en la reacción, se calcula de manera equivalente a la de cualquier otra máquina térmica.

Tabla 39: Parámetros de la energía libre de la celda, a través de la entalpía y entropía.

$W_{el} = \Sigma G = \Sigma H - (T^* \Sigma S)$	
• Ecuación 29: Energía libre de la celda, a través de la entalpía y entropía.	
1.	H , es la entalpía, mediada en julios por mol (J/mol).
2.	S , se trata de la entropía, en J/(mol*K ^o).
3.	W_{el} , es el trabajo generado por la celda.

En la ecuación anterior, se puede observar que la diferencia entre el trabajo realizado (W_{el}) y el incremento de entalpía (ΣH), es directamente proporcional al cambio de entropía (ΣS), considerando a la energía térmica totalitaria como el incremento de entalpía (ΣH). Al mismo momento, se le otorga al producto entre la temperatura de funcionamiento (T) y la variación de entropía (ΣS), el significado de cantidad de calor generado por una pila de combustible de ésta clase, operando de manera reversible.

La reacciones contenidas tras una variación de entropía negativa, aportan calor al entorno, mientras que las de valor positivo, pueden extraer el calor de su entorno si la generación irreversible de calor es menor que su absorción reversible. Por lo tanto, de las explicaciones anteriores se ha deducido que el potencial máximo para las reacciones producidas en el interior de una celda polimérica, a una temperatura y a una presión determinada, se puede calcular mediante la siguiente función.

Tabla 40: parámetros del potencial máximo generado en una pila de hidrógeno de tipo polimérica (PEMFC).

$\Sigma E = -\Sigma G / (n^* F)$	
• Ecuación 30: Potencial máximo generado en una pila de hidrógeno de tipo polimérica (PEMFC).	
1.	E , es el potencial máximo en voltios (V).
2.	G , es trabajo generado por la celda, el julios (J).
3.	n , se trata del número de electrones (e ⁻) participantes en la reacción.

4. F, consiste en la constante de Faraday, con un valor equivalente a 96487 Cº/mol.

Tabla 41: Potencial ideal de la celda en condiciones estándar.

<u>1.-Ecuación de la energía libre de Gibbs.</u>				
<u>Descripción</u>	<u>Símbolo</u>	<u>Unidades</u>	<u>Valor</u>	<u>Comentarios</u>
Incremento de entalpía estándar de la reacción.	ΣH	kJ/mol	-285.5	Obtenida a partir de la tabla de las entalpías estándar de formación.
Temperatura de operación	T	Kº	298	Equivalente en Kº a 25Cº.
Energía libre de Gibbs para la reacción a 25ºC.	ΣG	kJ/mol	-237.1	Obtenida a partir de la tabla de las energías estándar de formación.
Incremento de entropía estándar de la reacción.	$\Sigma S=(\Sigma H - \Sigma G)/T$	kJ/mol*Kº	-0.162416107	(Exotérmica)
<u>2.-Ecuación del potencial de la una celda de H₂ a 25Cº.</u>				
<u>Descripción</u>	<u>Símbolo</u>	<u>Unidades</u>	<u>Valor</u>	<u>Comentarios</u>
Energía libre de Gibbs para la reacción.	ΣG	J/mol	-237100	Obtenida a partir de la tabla de las energías estándar de formación.
Número de electrones que participan en la reacción	n	-	2	Se verifica en la reacción inicial.
Constante de Faraday.	F	Cº/mol	96487	Teórico.

Potencial ideal de la celda en condiciones atmosféricas.	$E = -\Sigma G/(n \cdot F)$	V	<u>1.228662929</u>	Potencial ideal a 25°C.

En la siguientes dos imágenes, se muestran los valores la energía libre estándar (ΣG) y del incremento de entalpía (ΣH) para la reacción obtenidas a partir de sus correspondientes tablas, las cuales se muestran en el apartado de "anexos" del presente estudio.

Tabla 42: energía libre estándar (ΣG).

Fórmula	Nombre compuesto	ΔG_f° KJ/mol
H ₂ O(l)	Agua líquida	-237,1
H ₂ O(g)	Agua vapor	-228,6
HF(g)	Fluoruro de hidrógeno	-270,7
HCl(g)	Cloruro de hidrógeno	-95,3
HI(g)	Yoduro de hidrógeno	1,7
CO(g)	Monóxido de carbono	-137,2
CO ₂ (g)	Dióxido de carbono	-394,4
NH ₃ (g)	Amoníaco	-16,5
NO(g)	Monóxido de nitrógeno	86,6
CH ₄ (g)	Metano	-50,8
C ₂ H ₆ (g)	Etano	-32,9
C ₂ H ₄ (g)	Etileno (eteno)	68,4
C ₂ H ₂ (g)	Acetileno (etino)	209,9
C ₃ H ₈ (g)	Propano	-24,4
C ₄ H ₁₀ (g)	n-Butano	-16,6
C ₆ H ₁₄ (l)	n-Hexano	35,0
C ₆ H ₆ (l)	Benceno	124,4
CH ₃ OH(l)	Metanol	-166,4
CH ₃ CH ₂ OH(l)	Etanol	-174,8
Br ₂ (l)	Bromo líquido	0,0
Br ₂ (g)	Bromo vapor	3,1
NaCl(s)	Cloruro sódico	-384,1
CaO(s)	Óxido de calcio (cal viva)	-604
CaCO ₃ (s)	Carbonato cálcico	-1128,8
C _(grafito)	Carbono grafito	0,0
C _(diamante)	Carbono diamante	2,9
I ₂ (s)	Yodo sólido	0,0
I ₂ (g)	Yodo vapor	19,3
O ₂ (g)	Oxígeno	0,0
O ₃ (g)	Ozono	142,7
SO ₂ (g)	Dióxido de azufre	-300,0
SO ₃ (g)	Trióxido de azufre	-370,0
NO ₂ (g)	Dióxido de nitrógeno	51,3
H ₂ O ₂ (l)	Peróxido de hidrógeno	-120,4
NH ₄ Cl(s)	Cloruro amónico	-202,7

Fuente: www.uimitube.com

Tabla 43: Incremento de entalpía (ΔH).

Fórmula	Nombre compuesto	ΔH_f°	Fórmula	Nombre compuesto	ΔH_f°
CO (g)	Monóxido de carbono	-110,4	CH ₃ CH ₂ OH (l)	Etanol	-277,7
CO ₂ (g)	Dióxido de carbono	-393,5	HCHO (g)	Formaldehído	-117,2
NO (g)	Monóxido de nitrógeno	90,3	HCOOH (l)	Ácido fórmico o metanoico	-424,7
NO ₂ (g)	Dióxido de nitrógeno	33,2	CH ₃ COOH (l)	Ácido acético	-484,3
N ₂ O ₄ (g)	Tetróxido de dinitrógeno	9,7	CCl ₄ (l)	Tetracloruro de carbono	-138,7
SO ₂ (g)	Dióxido de azufre	-296,9	CH ₃ Cl (g)	Clorometano	-81,9
SO ₃ (g)	Trióxido de azufre	-394,8	CHCl ₃ (l)	Cloroformo	-131,8
C (grafito)	Carbono grafito	0,0	CH ₃ CH ₂ CH ₃ (g)	Cloroetano	-105,0
C (diamante)	Carbono diamante	1,9	C ₆ H ₁₂ O ₆ (s)	Glucosa	-1274,4
O ₂ (g)	Oxígeno	0,0	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ (s)	Sacarosa	-2221,2
O ₃ (g)	Ozono	142,0	CH ₃ CHO (l)	Acetaldehído	-166,4
S (rómulo)	Azufre rómulo	0,0	CH ₃ COCH ₃ (l)	Acetona	-216,7
S (monoclínico)	Azufre monoclínico	0,3	CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH (l)	1-Propanol	-255,0
CS ₂ (l)	Disulfuro de carbono	-110,5	CH ₂ =CH ₂ (g)	Propeno o propileno	20,4
NH ₃ (g)	Amoníaco (gas)	-46,2	C ₆ H ₆ -CH ₃ (l)	Tolueno	50,0
NH ₃ (l)	Amoníaco (líquido)	-67,2	AgCl (s)	Cloruro de plata	-127,0
PCl ₃ (g)	Tricloruro de fósforo	-306,4	Ca(OH) ₂ (s)	Hidróxido de calcio	-352,0
PCl ₅ (g)	Pentacloruro de fósforo	-398,9	CaCO ₃ (s)	Carbonato cálcico (calcita)	-1207,6
PH ₃ (g)	Fosfina	9,3	CaO (s)	Óxido de calcio	-635,0
AsH ₃ (g)	Arsina	41,0	CaSO ₄ (s)	Sulfato cálcico	-1430,0
H ₃ PO ₄ (s)	Ácido fosfórico	-1281,1	CuO (s)	Óxido de cobre (II)	-155,0
HNO ₃ (l)	Ácido nítrico	-173,2	FeCl ₂ (s)	Cloruro de hierro (II)	-342,7
H ₂ SO ₄ (l)	Ácido sulfúrico	-811,3	FeCl ₃ (s)	Cloruro de hierro (III)	-403,3
HCl (g)	Cloruro de hidrógeno	-92,3	Fe ₂ O ₃ (s)	Óxido de hierro (III)	-825,7
HBr (g)	Bromuro de hidrógeno	-36,2	KCl (s)	Cloruro potásico	-437,1
HI (g)	Yoduro de hidrógeno	23,9	MgCl ₂ (s)	Cloruro de magnesio	-641,8
HCN (g)	Cianuro de hidrógeno	109,0	MgO (s)	Óxido de magnesio	-601,8
H ₂ O (g)	Agua (gas)	-241,6	Mg(OH) ₂ (s)	Hidróxido de magnesio	-924,7
H ₂ O (l)	Agua (líquida)	-285,8	NaOH (s)	Hidróxido sódico	-425,6
H ₂ O (s)	Agua (sólida), hielo	-292,6	NaF (s)	Fluoruro sódico	-571,0
H ₂ S (g)	Sulfuro de hidrógeno	-20,2	NaCl (s)	Cloruro sódico	-410,6
H ₂ Se (g)	Seleniuro de hidrógeno	85,6	NaBr (s)	Bromuro sódico	-359,0
H ₂ O ₂ (l)	Peróxido de hidrógeno	-186,3	NaI (s)	Yoduro sódico	-286,0
CH ₄ (g)	Metano	-74,8	NaCN (s)	Cianuro de sodio	-89,8
C ₂ H ₆ (g)	Etano	-84,4	NaHCO ₃ (s)	Bicarbonato sódico	-943,6
C ₂ H ₄ (g)	Eteno o etileno	52,2	NaNO ₃ (s)	Nitrato sódico	-466,7
C ₂ H ₂ (g)	Etileno o acetileno	226,9	NaNO ₂ (s)	Nitrito sódico	-359,0
C ₃ H ₈ (g)	Propeno	-103,8	NH ₄ NO ₃ (s)	Nitrato amónico	-366,1
C ₄ H ₁₀ (g)	Butano	-124,7	NH ₄ Cl (s)	Cloruro amónico	-314,4
C ₅ H ₁₂ (g)	Pentano	-173,1	PbO ₂ (s)	Dióxido de plomo	-276,3
C ₆ H ₁₄ (g)	Hexano	-198,7	SiO ₂ (s)	Óxido de silicio (sílice)	-851,0
C ₇ H ₁₆ (g)	Heptano	-187,8	XeF ₄ (g)	Tetrafluoruro de xenón	-284,2
C ₈ H ₁₈ (g)	Octano	-224,4	XeF ₆ (g)	Hexafluoruro de xenón	-401,3
C ₆ H ₆ (l)	Benceno	82,8	ZnO (s)	Óxido de zinc	-347,8
C ₆ H ₅ -CHO (l)	Benzaldehído	-88,8	ZnS (s)	Sulfuro de zinc	-202,7
CH ₃ OH (l)	Metanol	-236,7			

Fuente: www.uimitube.com

Ahora bien, como se ha explicado con anterioridad, las celdas de combustible poliméricas trabajan a bajas temperaturas, las cuales rondan los 90°C debido a que dicha temperatura de funcionamiento, permite a este tipo de celdas realizar arranques en cortos periodos de tiempo, junto con un alto grado de respuesta frente a los cambios demandados de potencia, sin ocasionar importantes grados de degradación antes los materiales que las componen. Por lo tanto, se debe de calcular el potencial ideal que ofrece cada celda de hidrógeno (H₂) al operar frente a estas temperaturas.

Para poder realizar el cálculo en condiciones diferentes a las estándar, se puede emplear bien la ecuación de Nernst, o bien mediante el cambio en la energía libre de Gibbs. Mediante el segundo método, se ha verificado que dicha energía es incrementada al disminuir la temperatura de operación, mientras que el potencial ideal es proporcional a la energía de Gibbs. De esta manera, se comprueba que existe una importante relación entre el potencial de la celda de hidrógeno (H₂) y su temperatura. A su vez, se verifica que los valores en las

variaciones de entalpía (ΣH) y entropía (ΣS) de la reacción, varían ligeramente, por lo que se les puede asumir constantes dentro de la ecuación.

Tabla 44: Potencial ideal de la celda de combustible, en condiciones normales.

3.-Ecuación de la energía libre de Gibbs.				
Descripción	Símbolo	Unidades	Valor	Comentarios
Incremento de entalpía estándar de la reacción.	ΣH	kJ/mol	-285.5	Obtenida a partir de la tabla de las entalpías estándar de formación.
Temperatura de operación	T	Kº	363	Equivalente en Kº a 90Cº.
Incremento de entropía estándar de la reacción.	ΣS	kJ/mol*k	-0.16241610	Calculado anteriormente.
Energía libre de Gibbs para la reacción a 90ºC.	$\Sigma G = \Sigma H - (T * \Sigma S)$	J/mol	-226542.953	Energía de la reacción a 90ºC.
4.-Ecuación del potencial de la una celda de H₂ a 90Cº.				
Descripción	Símbolo	Unidades	Valor	Comentarios
Energía libre de Gibbs para la reacción.	ΣG	J/mol	-226542.953	Obtenida en el apartado anterior.
Número de electrones que participan en la reacción	n	-	2	Se verifica en la reacción inicial.
Constante de Faraday.	F	Cº/mol	96487	Teórico.
Potencial de la celda.	$E = -\Sigma G / (n * F)$	V	<u>1.17395583</u>	Potencial ideal a 90ºC.

De acuerdo a los cálculos realizados mediante Microsoft Excel, el potencial ideal de una celda de hidrógeno (H₂) en condiciones reales es aproximadamente 1,17V.

Potencial real de una celda de hidrógeno (H₂).

Sin embargo, como ya se ha estudiado, en la realidad se generan una serie de caídas de tensión en el interior de una celda de combustible debidas a las polarizaciones. Para la explicación de la influencia por parte de esta clase de pérdidas sobre la disminución del potencial de salida en las celdas de hidrógeno (H₂), se han de tener en cuenta en un primer lugar, que las polarizaciones de activación y de concentración, pueden existir tanto en el ánodo como en el cátodo. Por lo tanto, se tienen las dos siguientes ecuaciones.

Tabla 45: Pérdidas por polarización.

$N_{\text{ánodo}} = N_{\text{activación en el ánodo}} + N_{\text{concentración en el ánodo.}}$
Ecuación 31: Pérdidas de polarización en el ánodo.
$N_{\text{cátodo}} = N_{\text{activación en el cátodo}} + N_{\text{concentración en el cátodo.}}$
Ecuación 32: Pérdidas de polarización en el cátodo.
1. N, es considerada como las pérdidas por polarización (V).

El efecto generado por la polarización, da lugar a una variación sobre el potencial del electrodo (E_{electrodo}), por lo que se obtienen los siguientes resultados en las ecuaciones que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 46: Variación de potencial en el ánodo y en el cátodo.

$V_{\text{ánodo}} = E_{\text{ánodo}} + N_{\text{ánodo}} $
Ecuación 33: Variación de potencial en el ánodo.
$V_{\text{cátodo}} = E_{\text{cátodo}} - N_{\text{cátodo}} $
Ecuación 34: Variación de potencial en el cátodo.
1. N, es considerada como las pérdidas por polarización (V). 2. V, es el potencial del electrodo, una vez aplicadas las pérdidas de polarización (V). 3. E, se trata del potencial en el electrodo (V).

El resultado neto sobre el flujo de corriente en una pila de combustible, consiste en incrementar el potencial del ánodo y disminuir el potencial del cátodo, reduciendo de esta forma la tensión de la celda. A la hora de considerar este último valor, se le ha de contribuir los potenciales del ánodo y del cátodo, junto con la polarización óhmica.

Tabla 47: Potencial de la celda.

$V_{\text{celda}} = V_{\text{cátodo}} - V_{\text{ánodo}} - (I \cdot R)$
Ecuación 35: Potencial de la celda de hidrógeno.
4. V, son las tensiones de la celda, ánodo y cátodo respectivamente, en voltios (V).

5. I , se trata de la intensidad de corriente que atraviesa la celda, en amperios (A).
6. R , considerada como la resistencia total de la celda en ohmios (Ω).

Si ahora se sustituyen la ecuación anterior dentro de las de la variación de potencial en los electrodos (ecuaciones 32 y 33), se obtiene la función final que proporciona un valor real del potencial de salida en una celda de combustible.

Tabla 48: Potencial final de la celda de combustible.

$V_{\text{celda}} = \sum E_e - N_{\text{ánodo}} - N_{\text{cátodo}} - (I \cdot R)$	
Ecuación 36: Potencial final de la celda de combustible.	
1.	V_{celda} , es el potencial real proporcionado por la celda de hidrógeno, en voltios (V).
2.	$\sum E_e$, consiste en la variación entre el potencial del cátodo y el del ánodo, en voltios (V).
3.	N , es considerada como las pérdidas por polarización (V).
4.	I , es la intensidad de corriente que atraviesa la celda, en amperios (A).
5.	R , se trata de la resistencia total de la celda en ohmios (Ω).

La anterior ecuación, muestra que el flujo de corriente eléctrica a través de una pila de hidrógeno, posee como resultado una disminución en la tensión de dicha celda, debido a los tres tipos de pérdidas estudiados anteriormente. De manera genérica, como se explicó en el "estado del arte", el valor final de este conjunto de pérdidas, puede alcanzar los **0,2V**.

Tabla 49: Potencial real de la celda de combustible.

	Caída de tensión (V).	Cálculo.	Potencial real (V).
5.-Potencial real de la celda de H₂.	0.2	$E = E_0 - C_v$	0.973955834

De acuerdo a lo anterior, se obtiene que el potencial real de cada celda de hidrógeno (H₂) es de **0,97V**. Teóricamente, diferentes estudios, han citado que dicho potencial ha de rondar en torno al voltio, lo cual apoya los cálculos realizados.

Rendimiento de la celda de hidrógeno (H₂).

Tras conocer el potencial real generado por cada una de las celdas de combustible, se ha de obtener su eficiencia real de operación. Para su logro, en un primer lugar se debe verificar la eficiencia ideal y así, a través de esta, poder concluir con la obtención de dicha finalidad.

Tabla 50: Rendimiento ideal de la celda.

Rendimiento ideal (N _i).	$N_i = \sum G / \sum H$		
Descripción	Símbolo	Valor	Unidades

Energía libre de Gibbs para la reacción en condiciones estándar.	ΣG	-237.1	kJ/mol
Incremento de entalpía estándar de la reacción.	ΣH	-285.5	kJ/mol
Rendimiento ideal de la celda.	N_i	0.83047285	83%.

Tras realizar los cálculos, se obtiene un rendimiento ideal del orden de un 83%, por lo que se observa que el valor adquirido coincide prácticamente con la eficiencia teórica que muestran diversos estudios y libros, los cuales muestran rendimientos ideales de entre un 83% y un 85%. Seguido se procede con el cálculo de la eficiencia real.

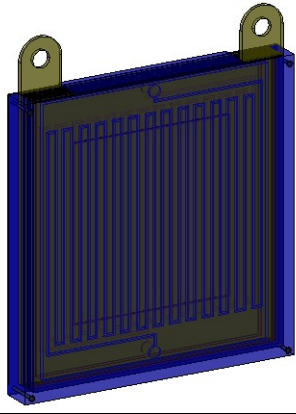
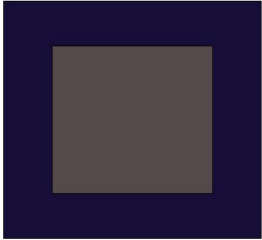
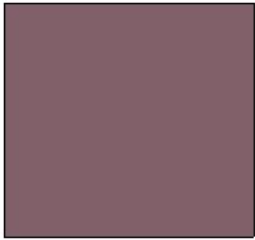
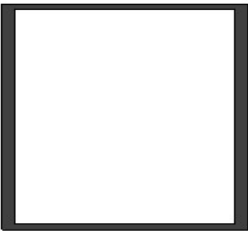
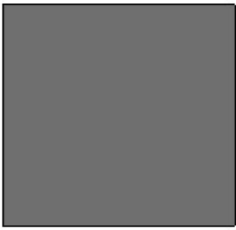
Tabla 51: Rendimiento real de la celda.

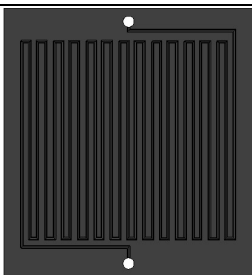
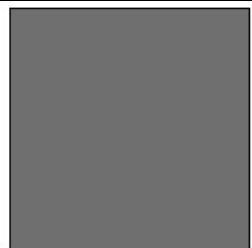
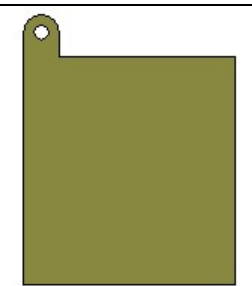
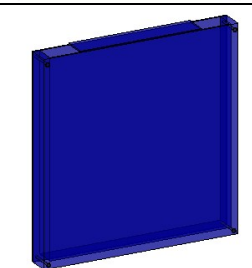
Rendimiento real (N_r).	$N_r = (E / E_0) * N_i$		
Descripción	Símbolo	Valor	Unidades
Potencial real de la celda.	E	0.97395583	V
Potencial ideal de la celda.	E_0	1.17395583	V
Rendimiento real de la celda	N_r	0.68899004	68%.

Finalmente, se obtiene una eficiencia real en la celda de hidrógeno capaz de alcanzar un 68% de su capacidad.

Una vez obtenida la tensión por cada celda de hidrógeno (H₂), se va a proceder al cálculo en el apilamiento de las celdas de combustible, mejor conocido como Stack. Antes de proceder a los cálculos de la pila de combustible, se va a mostrar en la siguiente tabla la celda de hidrógeno (H₂) modelada, junto con sus componentes y propiedades escogidas, de acuerdo a lo estudiado anteriormente en el "estado del arte".

Tabla 52: Elementos de la celda de hidrógeno (H₂).

	• <u>Celda de combustible polimérica (FCPEM)</u> (x250).
	• <u>Membrana de electrodos y electrolito (MEA)</u> (x1) con una superficie efectiva de 600 cm² (24,5x24,5cm) y una densidad de corriente de 0,5A/cm². • Electrodo compuesto de una capa de platino (Pt) y polvo de carbón (Vulcan), sobre una lámina de Teflón (PTFE) y carbono (C). • Membrana electrolítica de Nafion.
	• <u>Placa difusora</u> (x2) compuesta de láminas de carbono y teflón (PTFE).
	• <u>Juntas de soporte de placas bipolares</u> (x4), compuestas de grafito.
	• <u>Placa protectora de las placas bipolares</u> (x4), de grafito.

	• <u>Placa bipolar</u> (x2) de grafito con canales paralelos de 1,5mm de diámetro.
	• <u>Placas de soporte entre las placas colectoras y las terminales</u> (x2) de titanio (Ti).
	• <u>Placas colectoras</u> de cobre (Cu), recubiertas de una capa de oro (Au) y níquel (Ni).
	• <u>Placas terminales</u> (x2) compuestas de polímeros termoplásticos.

Fuente: Las figuras han sido realizadas por el autor del presente estudio.

Parámetros de la pila de combustible.

Inicialmente, se ha de calcular la superficie de su área activa, junto con el número de unidades que la formarán. Para una determinada aplicación, los datos del diseño vienen impuestos por los requerimientos de la aplicación, a la cual se la va a entregar la energía eléctrica generada. Éstos son fundamentalmente la tensión y la potencia, quedando fijada la corriente generada por siguiente expresión.

Tabla 53: Intensidad total establecida en una pila de combustible.

$I_{\text{total}} = P/V_{\text{total}}$
• Ecuación 37: Intensidad total establecida en una pila de combustible.

1. I_{total} , es la intensidad total en una pila de combustible, en amperios (A).
2. P , consiste en la potencia de dicha pila, en vatios (W).
3. V_{total} , es el potencial total de la pila de combustible, en voltios (V).

Para el cálculo del potencial total (V_{total}) en el proceso de apilamiento en serie de las celdas, se realiza bien mediante la suma de todas las tensiones individuales, o bien por el producto entre el potencial promedio y el número total de celdas.

Tabla 54: Potencial total de la pila de combustible.

$V_{total} = \sum V_{celda} = V_{celda} * n^o$	
Ecuación 38: Potencial total de la pila de combustible.	
1.	V_{total} , es el potencial total de la pila de combustible (V).
2.	V_{celda} , es la tensión de cada celda (V).
3.	n^o , se trata del numero de celdas que componen la pila.

A su vez, el área activa del electrodo, se puede calcular mediante la siguiente expresión.

Tabla 55: Área efectiva del electrodo.

$A_{electrodo} = I_{total} / j$	
Ecuación 39: Área efectiva del electrodo.	
1.	$A_{electrodo}$, se trata del área efectiva del electrodo, en centímetros cuadrados (cm ²).
2.	j , es la densidad de corriente, cuyo valor oscila los 0,5 A/cm ² .

El potencial de la pila y la densidad de corriente, de manera general no son parámetros independientes, ya que se encuentran relacionados a través de la curva de polarización. Estas curvas, normalmente se determinan de forma experimental en bancos de ensayos. Para ello, se demandan a la pila diferentes potencias empleando cargas electrónicas dinámicas. Además, como bien se ha comentado, se han empleado satisfactoriamente pilas de entre las 200 y las 250 celdas con áreas activas que alcanzan los 1.000 cm², a pesar de que el rango más común de trabajo está entre los 50 y los 600 cm². Para grandes áreas activas de electrodo, es muy complicado garantizar una uniforme distribución por parte de los gases reactivos sobre las capas catalíticas, ya que el número máximo de celdas se encuentra limitado por las fuerzas de compresión, su rigidez estructural y la pérdida de presión tras la circulación de los gases a través de los diferentes conductos del sistema. Para nuestro apilamiento vamos a trabajar con un número de 250 celdas, y un área efectiva de 600cm².

Tabla 56: Parámetros de la pila de hidrógeno (H₂).

	<u>Símbolo</u>	<u>Valor</u>	<u>Unidades</u>
Número de celdas.	n	250	-
Superficie efectiva.	A	600	cm ²
Densidad eléctrica.	j	0.5	A/cm ²

Por lo tanto los parámetros obtenidos han sido:

Tabla 57: Cálculos de la pila de hidrógeno (H₂).

Tensión total:			
$V_t = V_{celda} * n$	V_t	243.488958	Voltios (V).
Intensidad total:			
$I_t = A * j$	I_t	300	Amperios (A).
Potencia de la pila:			
$P = I_t * V_t$	P	73.0466875	Kilovatios (kW).

Finalmente, de acuerdo a los cálculos obtenidos de acuerdo a la pila de combustible, en el simulador se va a introducir una pila de hidrógeno de **73kW**.

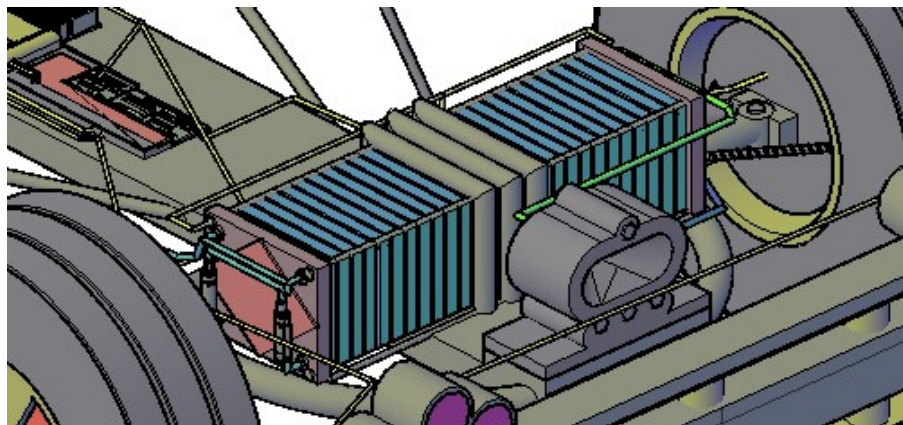


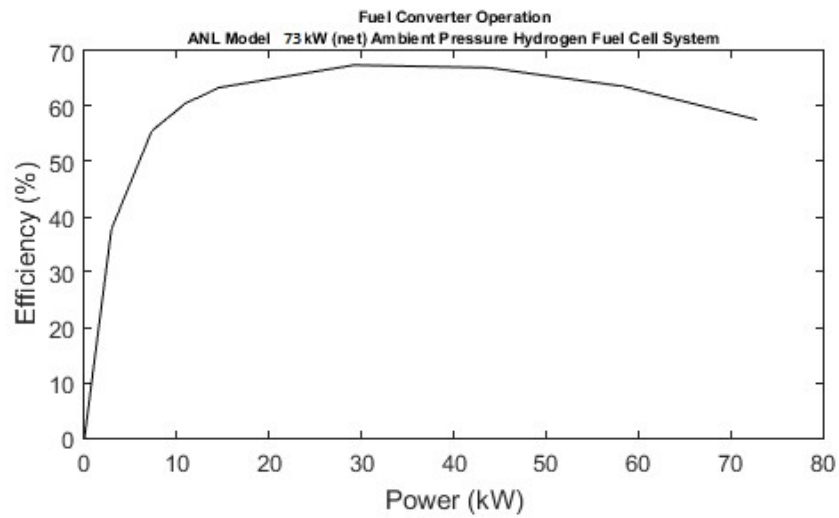
Figura 168: Pila de hidrógeno (H₂) de 73kW, modelada en Auto CAD, la cual se encuentra compuesta de 250 celdas y posee un área efectiva de 600cm².

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Tras introducir en el simulador los parámetros obtenidos en los cálculos de la pila de combustible, éste va a proporcionar una gráfica con la cual muestra la relación entre su potencia (kW) y su rendimiento (%), junto con una segunda, capaz de relacionar el consumo específico de combustible (g/kWh) y su potencia (kW). Ambas se visualizan a continuación.

- **Potencia:** 73kW.
- **Eficiencia:** 68%.
- **Masa:** 298kg.

Eficiencia (%) - Potencia (kW)



Consumo de combustible (g/kWh) - Potencia (kW)

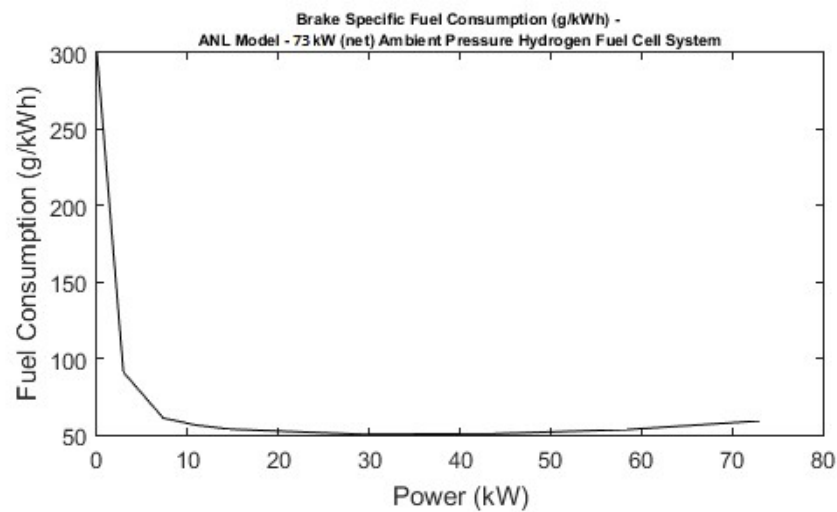


Diagrama de bloques de la pila de combustible

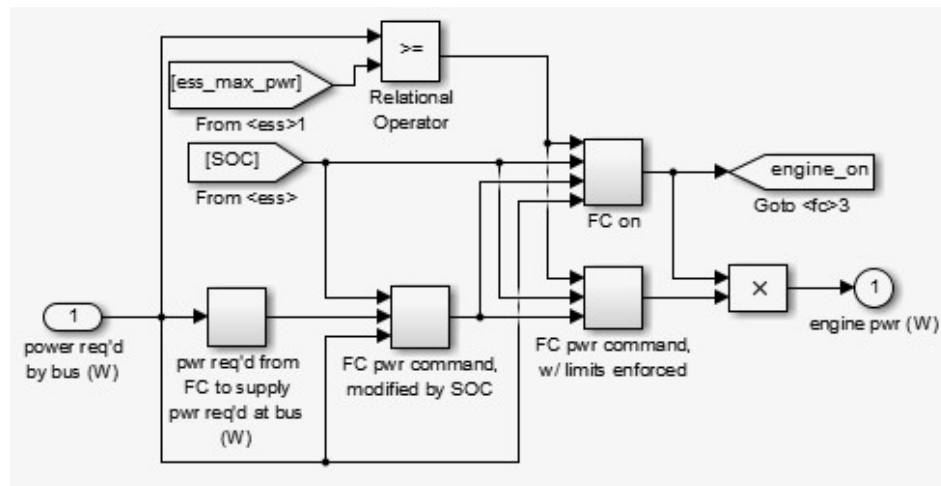
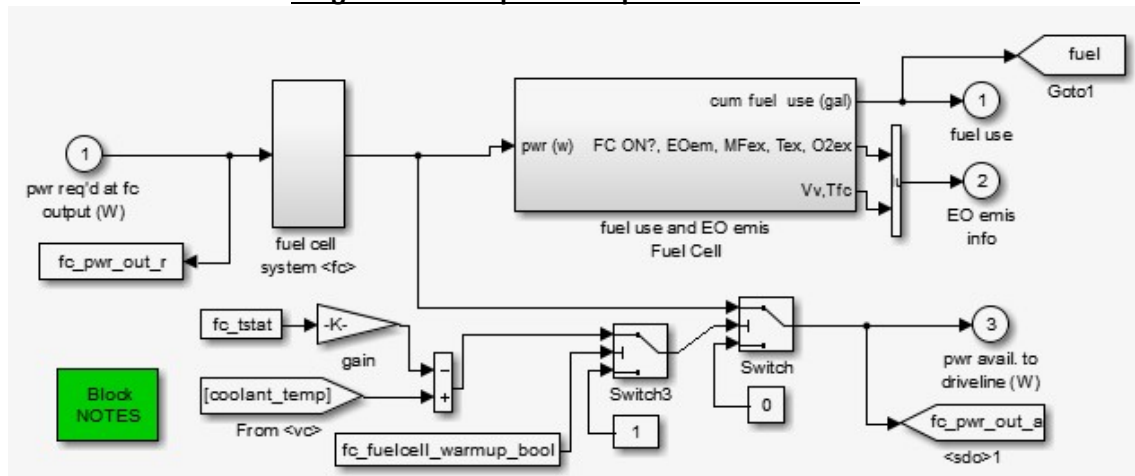


Figura 169: Gráficas de eficiencia/potencia y de consumo específico/potencia, respectivamente, junto con el diagrama de bloques del funcionamiento de la pila de hidrógeno (H₂) y el diagrama de bloques de su unidad de control.

Fuente: Gráficas obtenidas a partir de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

A su vez, como ya se ha estudiado en apartados anteriores, la investigación de nuevas clases de membranas electrolíticas en esta clase de celdas de combustible, como pueden ser las de grafeno o las de quitosán, son capaces de incrementar sus propiedades, ya que ofrecen mayores densidades de corriente. De esta manera, si este parámetro es incrementado, eleva a su vez la intensidad en la pila de combustible y con ello su potencia. Por esta razón, con el empleo de novedosos materiales, se puede disminuir el número de celdas por unidad de pila, para obtener la misma potencia, con lo que decrece su volumen y su masa.

4.2.3.-Depósitos de almacenamiento del hidrógeno (H₂).

Para el modelo del vehículo realizado, se han empleado dos depósitos situados en los laterales de su estructura. Ambos depósitos almacenan el hidrógeno (H₂) de manera gaseosa a

alta presión, ya que es la manera más eficiente de realizarlo a día de hoy, tal y como se ha explicado en el "estado del arte".

Además, esta metodología es la empleada para los vehículos y prototipos existentes que trabajan con este mecanismo. Por lo tanto, para esta clase de almacenamiento, el combustible gaseoso ha de ser almacenado a una presión de 70MPa, dando lugar a una densidad equivalente a 40,816g/l en estas condiciones.

A su vez, los materiales a emplear deben disminuir sus pérdidas y evitar posibles incidentes, por lo que el grosor empleado para esta clase de depósitos, estará compuesta por tres capas de diferentes materiales, tal y como se estudió anteriormente, para cumplir su objetivo. Las características de los depósitos se muestran en la siguiente tabla. En cada depósito, a su entrada y a su salida se ha de instalar un dispositivo electrónico, el cual permita el paso de dicho gas, junto con el control de las condiciones de éste. Ambos elementos modelados se muestran en el apartado de "Anexos".

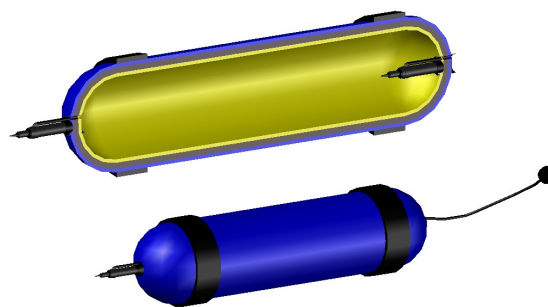


Figura 170: Depósito de alta presión del vehículo modelado en Auto CAD.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Componentes del depósito.

- La capa interna, la cual se encuentra en contacto con el combustible, se trata de un revestimiento polimérico de nylon, la cual se encarga fundamentalmente de prevenir las pérdidas y fugas de gas.
- La capa intermedia, proporciona una elevada solidez estructural dentro del sistema, por lo cual se encuentra formada por un plástico reforzado de fibra de carbono.
- La capa externa, se encarga de proporcionar una resistencia ante la abrasión del depósito. Para ello, se encuentra compuesta de un polímero reforzado con fibra de vidrio.
- Dos elementos de control electrónica del hidrógeno (H₂) por cada depósito.

Dimensiones de cada depósito.

Poseen un volumen por cada depósito de 0,061m³, por lo que el volumen de almacenamiento total será de 0,122m³ (122L), tomados de referencia desde su capa interior, por lo que es su capacidad de almacenamiento. A continuación se muestran las dimensiones tomadas.

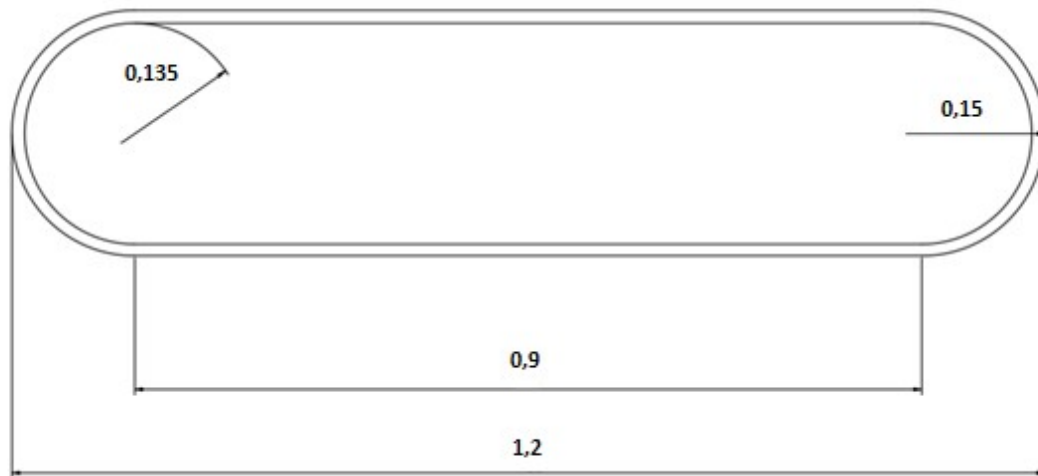


Figura 171: Medidas tomadas en el depósito, en metros (m).

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

A continuación se muestran los cálculos realizados mediante una hoja de Excel. Para el cálculo de su volumen se ha empleado el volumen de un cilindro más el de una esfera de mismo radio.

- **Ecuación 40:** $V_{\text{Cilindro}} = \pi * R^2 * h.$
- **Ecuación 41:** $V_{\text{Esfera}} = \frac{4}{3} * \pi * R^3.$
- **Ecuación 42:** $V_{\text{Depósito}} = \pi * R^2 * (h + \frac{4}{3} * R).$

De acuerdo a dichas ecuaciones se obtiene:

Tabla 58: Volumen del depósito.

<u>Parámetro</u>	<u>Valor</u>	<u>Unidades</u>	
Longitud entre centros esféricos	0.9	m	
Radio exterior.	0.15	m	
Radio interior.	0.135	m	
Longitud del depósito.	1.2	m	
Radio interno.	0.015	m	<u>Volumen en litros (L)</u>
Volumen externo.	0.077754418	m³	77.75441818

Volumen interno.	0.061835968	m³	61.8359682

De acuerdo a los resultados, se observa que cada uno de estos depósitos posee una capacidad de almacenaje que ronda los 61L, similar a la de un vehículo convencional (55L). Debido a que el gas en el interior de estas unidades de almacenaje posee una presión de 700bar (70MPa), correspondiendo a una densidad del hidrógeno de 40,816g/l, se puede obtener de manera sencilla la cantidad de hidrógeno (H₂) que son capaces de almacenar.

Tabla 59: Masa de hidrógeno (H₂) en cada depósito.

<u>Parámetro.</u>	<u>Símbolo.</u>	<u>Valor.</u>	<u>Unidades.</u>
Presión.	P	700	bar.
Densidad a 700 bares.	p	40,816	g/l.
Volumen de cada depósito.	V	61,8359682	l.
Masa de H ₂	M = p * V	2.523896878	kg.

Por lo tanto, cada depósito de alta presión es capaz de almacenar alrededor de 2,52kg de hidrógeno H₂ en estado gaseoso a una presión de 700bares. Debido a las propiedades de dicho combustible frente a los empleados de manera convencional, se necesita un mayor volumen de almacenamiento para adquirir una autonomía competente, por lo que en el modelo diseñado se han instalado dos unidades. Finalmente el automóvil es capaz de almacenar 5kg de H₂.

4.2.4-Compresores.

Para lograr almacenar la cantidad anterior de hidrógeno en dicho volumen a 70MPa, es necesario aplicar una energía de compresión, a la hora de suministrar dicho combustible. Durante el cálculo de este trabajo, se va a suponer en un primer lugar que dicha masa gaseosa se encuentra inicialmente en condiciones atmosféricas (25Cº y 1atm) inicialmente, por lo cual tendrá una densidad igual a 0,0893kg/m³, como se estudió en el “estado del arte”. De esta manera, conociendo la masa y la densidad podremos obtener el volumen inicial, para a continuación calcular el trabajo a través de las presiones y de los volúmenes tanto iniciales como finales. El proceso en el interior de un compresor es adiabático, mientras que el hidrógeno al ser un gas biatómico y tomado como gas ideal, posee una constante n=1,4.

Tabla 60: Energía necesaria para elevar la presión del H₂ desde su valor atmosférico hasta 70MPa.

	<u>Valor 1</u>	<u>Unidades</u>	<u>Valor 2</u>	<u>Unidades</u>
Volumen final.	122.5	L	0.1225	m ³
Presión final.	70	MPa	70000000	Pa
Presión inicial (Condiciones atmosféricas).	1	atm	101325	Pa
Densidad inicial (Condiciones atmosféricas).	0,0893	kg/m ³		
Masa	5	kg		
Volumen inicial (V=m/p).	55,9910414	m ³		
<u>Trabajo de compresión:</u>		$W=(P_1*V_1 - P_2*V_2)/(n - 1)$		
n= 1,4 por ser el H₂ biatómico y al tomarlo como un gas ideal.				
<u>Trabajo del compresor</u>	<u>Valor</u>	<u>Unidades</u>	<u>Valor</u>	<u>Unidades</u>
W	-7254269,32	J	-7254,26932	<i>KJ</i>
*NOTA: El signo (-) significa que se aporta energía.				

Por lo tanto, para realizar la compresión de los 5kg de hidrógeno (H₂) a 70MPa en los 122,5L de los depósitos, se han de aplicar 7254,3kJ. Sin embargo, como se estudió con anterioridad, a la hora de realizar el repostaje de dicho gas, las hidrogeneras lo suministran con una presión media de 35MPa, lo que el automóvil va a requerir una menor energía para su compresión hasta los 70MPa. Para obtener los resultados de este segundo supuesto, se va a emplear el mismo procedimiento que en el caso anterior.

Tabla 61: Energía necesaria para elevar la presión del H₂ desde 35MPa hasta 70Mpa.

	<u>Valor 1</u>	<u>Unidades</u>	<u>Valor 2</u>	<u>Unidades</u>
Volumen final.	122.5	L	0.1225	m ³
Presión final.	70	MPa	70000000	Pa
Presión inicial.	35	MPa	35000000	Pa
Densidad inicial a 35MPa.	24.03	g/l	24.03	kg/m ³
Masa	5	kg		
Volumen inicial (V=m/p).	0.208073	m ³	208.0732418	l
<u>Trabajo de compresión:</u>		$W=(P_1*V_1 - P_2*V_2)/(n -1)$		
n= 1,4 por ser el H₂ biatómico y al tomarlo como un gas ideal.				
<u>Trabajo com.</u>	<u>Valor.</u>	<u>Unidades.</u>	<u>Valor.</u>	<u>Unidades.</u>
W	-3231091.344	J	-3231.091344	<i>kJ</i>
*NOTA: El signo (-) significa que se aporta energía.				

De acuerdo a los resultados obtenidos a través de Microsoft Excel, para comprimir el hidrógeno en los depósitos desde el abastecimiento en la hidrogenera hasta los 70MPa, se necesita aplicar un trabajo de 3231,09kJ.



Figura 172: Inyector de compresión de hidrógeno (H₂).

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Debido a que el tiempo de repostaje medio para un depósito de estas dimensiones es de 5mn, la potencia del compresor se calculará de la siguiente forma.

Tabla 62: Potencia del compresor.

<u>Potencia del compresor.</u>	$P = W / t$			
	Valor.	Unidades 1.	Valor.	Unidades 2.
Trabajo de compresión (W).	-3231.091344	kJ		
Tiempo de repostaje (t).	5	mn	300	s
Potencia (P).	-10.77030448	kW		

Finalmente, se observa que la potencia máxima consumida por los compresores a la entrada de los depósitos es de **10,77kW**.

4.2.5.-Conductos de gases.

Como bien se explico en el "estado del arte" en los conductos por los cuales circula el oxígeno (O₂) proveniente del exterior y en los que circula el agua (H₂O) generada, se pueden emplear los materiales convencionales al igual que en los automóviles que basan su funcionamiento en combustibles convencionales, pudiendo ser polímeros o aleaciones metálicas.

Por el contrario, en los conductos que comunican a la pila de combustible con los depósitos de hidrógeno (H₂), debido a la circulación de este gas, se deben emplear materiales que proporcionen una importante seguridad y así evitar las posibles fugas de este gas. Para ello, se va a emplear un material compuesto de tres capas al igual que en los depósitos de almacenamiento de alta presión.

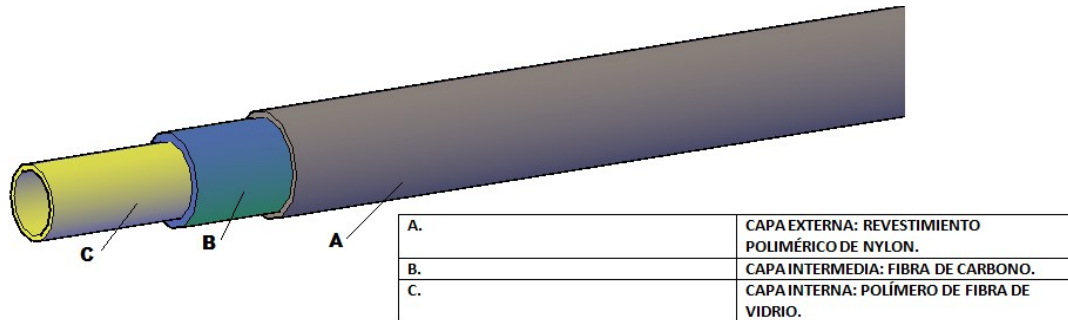


Figura 173: Conducto de hidrógeno (H₂).

Fuente: Este modelo ha sido realizado por el autor del presente estudio.

Materiales.

- La capa interna, la cual se encuentra en contacto con el combustible, se trata de un revestimiento polimérico de nylon, la cual se encarga fundamentalmente de prevenir las pérdidas y fugas de gas.
- La capa intermedia, proporciona una elevada solidez estructural dentro del sistema, por lo cual se encuentra formada por un plástico reforzado de fibra de carbono.
- La capa externa, se encarga de proporcionar una resistencia ante la abrasión del depósito. Para ello, se encuentra compuesta de un polímero reforzado con fibra de vidrio.

4.2.6.-Toma del oxidante (O₂).

Dentro del modelo empleado, la pila de combustible necesita de un sistema mecánico que proporcione el aporte del oxígeno (O₂) al cátodo. Éste, se encuentra compuesto de un inyector de aire, un intercambiador de humedad y una válvula de purga, capaz de eliminar las impurezas y otros gases inertes que afecten a la potencia generada por la pila. De esta forma, se consigue obtener a partir de los gases que componen el aire obtenido del exterior, una importante proporción de oxígeno (O₂) en el ánodo.

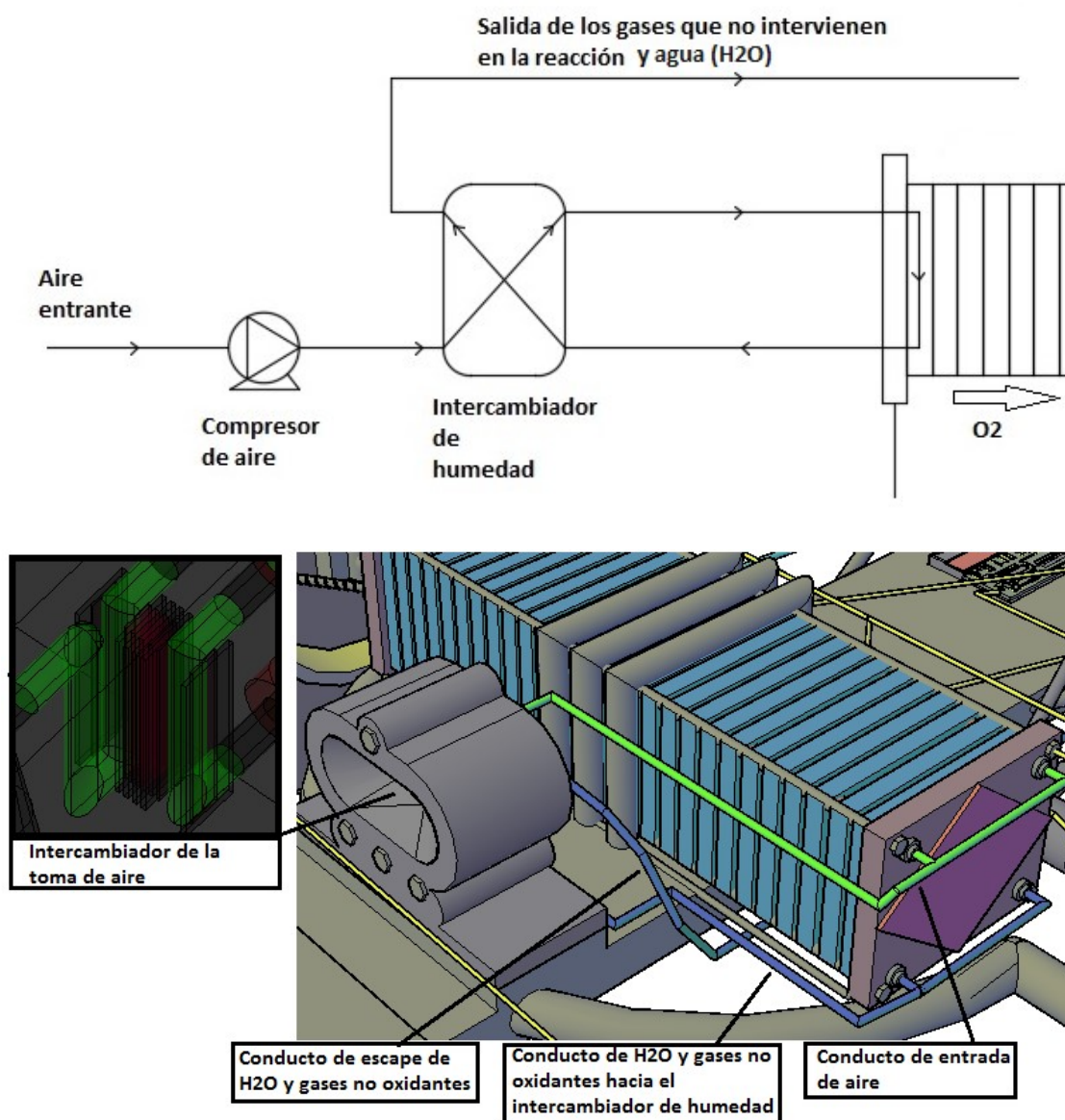


Figura 174: Esquema del circuito de oxidante.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

A continuación, se procede a calcular la cantidad necesaria de oxígeno (O₂) y de aire para hacer reaccionar los 5kg de combustible empleado. En un primer lugar se muestra la composición promedia del aire ambiente, tal y como se mostró en el "estado del arte", para continuar con los cálculos.

Tabla 63: Cálculo de la masa de oxígeno y de la masa de aire a emplear por el sistema.

Componente.	Concentración en volumen (%).
Nitrógeno (N ₂)	78,03
Oxígeno (O ₂)	20,99

Dióxido de carbono (CO ₂)	0,03
Argón (Ar)	0,94
Neón (Ne)	0,00123
Helio (He)	0,0004
Criptón (Kr)	0,00005
Xenón (Xe)	0,000006
Hidrógeno (H ₂)	0,01
Metano (CH ₄)	0,0002
Óxido nitroso (N ₂ O)	0,00005
Vapor de agua (H ₂ O)	Depende del lugar.
Ozono (O ₃)	Depende del lugar.
Partiendo de la reacción ideal, se obtienen los moles de hidrógeno (H₂) y de oxígeno (O₂) que tienen lugar. 2H₂ + O₂ -> 2H₂O Moles de H₂: 2 moles. Moles de O₂: 1 mol. De acuerdo a la cantidad de hidrógeno (H₂) empleada, los 5kg, se pueden obtener los moles equivalentes, ya que como bien se estudió anteriormente su masa molar es de 2,02g/mol. 5000g de H₂ * (1mol de H₂ / 2,02g) = 2475,24 moles. Tras conocer los moles de gas hidrógeno (H₂), se procede a ajustar la reacción. 2475,24H₂ + 1237,62O₂ -> 2475,24H₂O Moles de H₂: 2475,24 moles. Moles de O₂: 1237,62 moles. Una vez conocidos los moles de oxígeno (O₂), se pueden calcular los moles de nitrógeno (N₂) generados, a partir de la concentración de dichos gases en el aire. - Moles de N₂ = (moles de O₂) * (Concentración de N₂/Concentración de O₂) = 1237,62*(78,03/20,99) = 4600,84 moles de N₂. Seguido, ya se pueden conocer los moles de aire, mediante la suma de los moles de oxígeno (O₂) y los de nitrógeno (N₂), despreciando el 0,98% del resto de gases. - Moles de aire= moles de N₂ + moles de O₂ = 4600,84 + 1237,62 = 5838,46 moles de aire. A continuación, se procede al cálculo de las masas de cada componente, ahora que son conocidos los moles. - Masa de O₂ = 1237,62 mol de O₂ * (16 + 16) g/mol O₂ = 39603,84g de O₂. - Masa de N₂ = 4600,84 moles de N₂ * (14 + 14) g/mol N₂ = 128823,52g de N₂ Por lo tanto, la masa de aire, es la suma de las masas de nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂). - Masa de aire = 39603,84 + 128823,52 = 168427,36g de aire.	

Como se observa en los cálculos anteriores, para reaccionar los 5kg de hidrógeno (H_2), se necesita de **39,6kg de oxígeno (O_2)**, obtenidos a partir de **168,4kg de aire** del exterior.

4.2.7.-Unidad electrónica de control (CPU).

Un vehículo de pila de hidrógeno (H_2) debe llevar incorporado una unidad electrónica de control, al igual que los el resto de vehículos actuales, para así controlar y optimizar su funcionamiento.

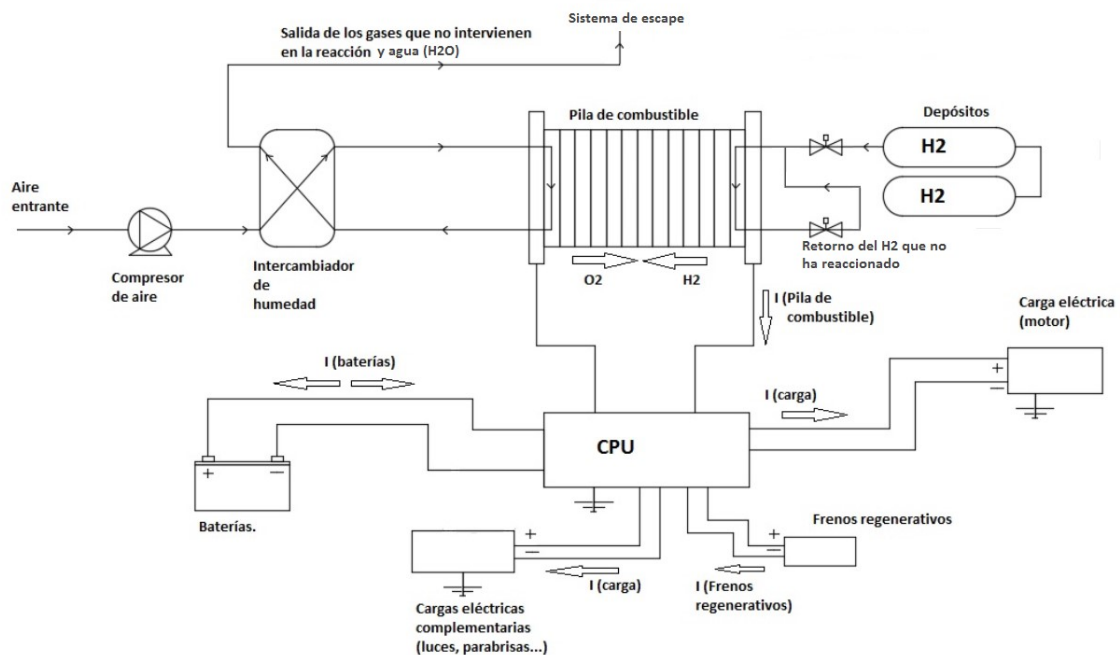
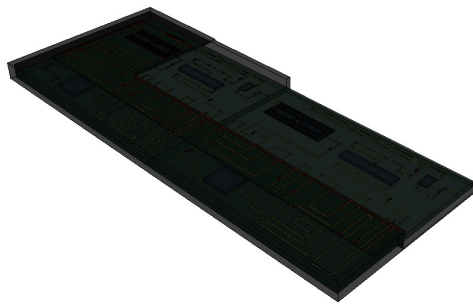


Figura 174: Modelado 3D en Auto CAD de la placa base de una CPU y diagrama de funcionamiento del vehículo.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

Entre su amplio campo de funciones dentro del automóvil, como ya se ha estudiado, permite medir y controlar tanto las presiones, como las temperaturas del hidrógeno (H_2) contenido en el interior de los depósitos; permitir la entrada del aire (O_2) a la pila de combustible; controlar y regular la entrada de hidrógeno (H_2) en las celdas de combustible;

regular la tensión y la corriente eléctrica generada en la pila; mantener el control sobre el motor eléctrico; regular los procesos de carga y descarga en los sistemas de almacenamiento energético; detectar los picos de demanda requeridos en el motor eléctrico, para a continuación combinar tanto la energía generada por la pila como la energía almacenada en las baterías; detectar fallos generados en el sistema para mantener la seguridad de éste; y controlar el resto de componentes del vehículo, tales como el sistema de alumbrado e intermitencia o los limpiaparabrisas, entre otros.

4.2.8.-Sistema de almacenamiento energético (baterías).

De acuerdo a lo ya estudiado en el estado del arte, dentro de las baterías más empleadas a día de hoy para este tipo de aplicaciones, la que mejores prestaciones proporciona son las baterías de ión litio (Li). A su vez, también se observado la aparición de nuevas clases de sistemas de almacenamiento energético, las cuales poseen una mayor eficiencia frente a las convencionales. En el modelo realizado, se van a emplear baterías de ión litio (Li), debido a que dentro de las clases que nos ofrece el simulador, éstas son las que mayores prestaciones le ofrecen al sistema.

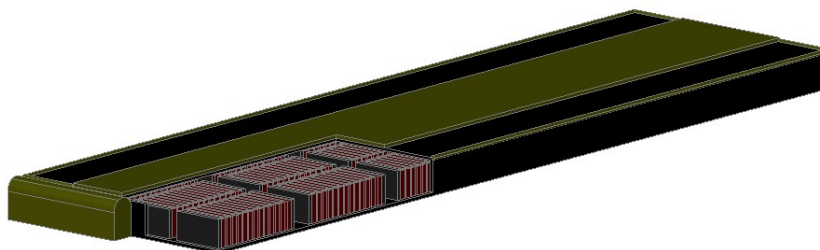


Figura 175: Sistema de almacenamiento energético empleado en el modelado de Auto CAD 3D.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

El sistema de almacenamiento energético empleado de acuerdo a las opciones que ofrece el simulador y de acuerdo con la potencia generada por la pila de hidrógeno (H₂), se trata de un conjunto de baterías de ión litio (Li) con una potencia total de 25kW. Las propiedades de sus ciclos de carga y descarga generados por el simulador, se muestran en las siguientes figuras.

- **Potencia:** 25kW.
- **Potencial:** 267V.
- **Masa:** 28kg.

Propiedades de carga y descarga.

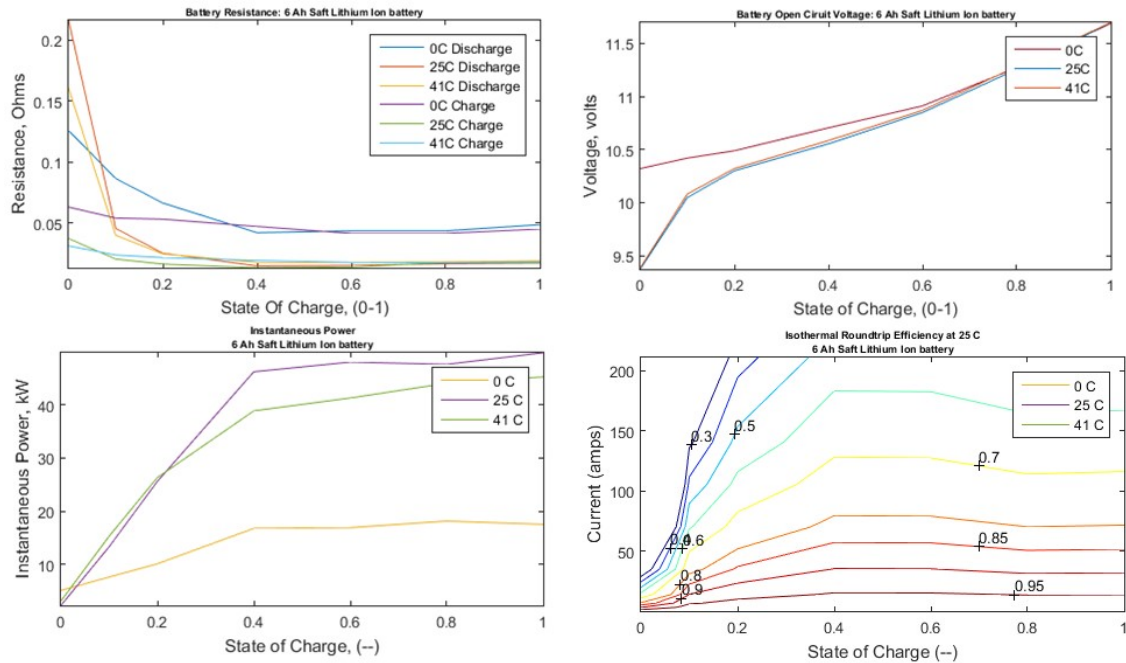


Diagrama de bloques de las baterías.

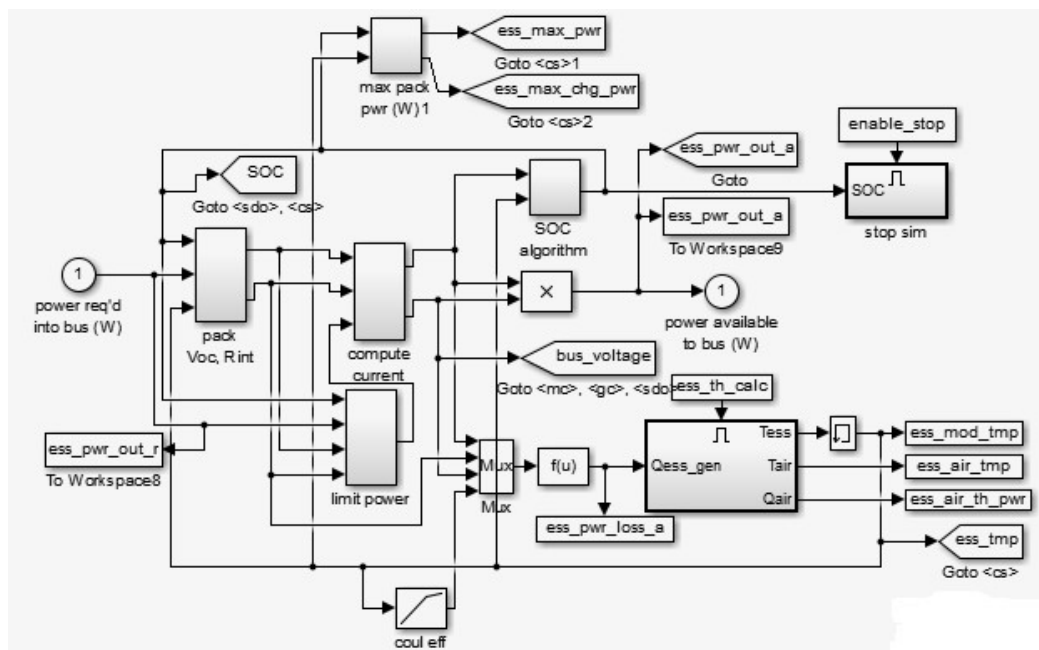


Figura 176: Propiedades gráficas del sistema de baterías de ión litio (Li) empleado y su diagrama de bloques.

Fuente: Obtenidas a partir de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

4.2.9-Motor eléctrico.

Una vez calculados los parámetros de la pila de combustible y escogido el tipo de baterías a emplear, el simulador muestra el modelo de motor eléctrico más apropiado para el sistema. De acuerdo a los cálculos obtenidos, el vehículo va a emplear un motor eléctrico de corriente alterna de 65kW con su respectivo rendimiento de 92%, por lo que se observa que el vehículo muestra una potencia frente a la finalidad buscada. Dicho elemento se encuentra situado en la parte trasera del modelo diseñado, proporcionando una tracción al eje posterior del vehículo.

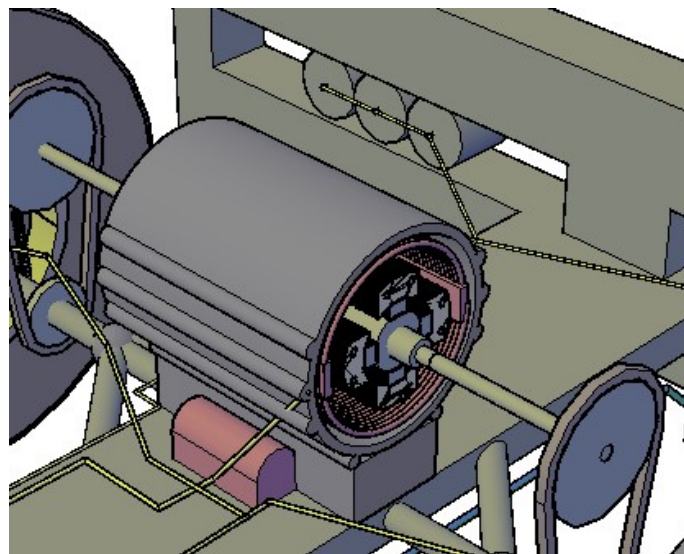


Figura 177: Motor eléctrico del vehículo modelado en Auto CAD 3D.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

En la siguiente figura se observan las características que ofrece este tipo de motor eléctrico, el cual ha sido empleado.

- **Potencia:** 65kW (90CV).
- **Eficiencia:** 92%.
- **Masa:** 91kg.

Par del motor (Nm) - Velocidad de rotación (rpm)

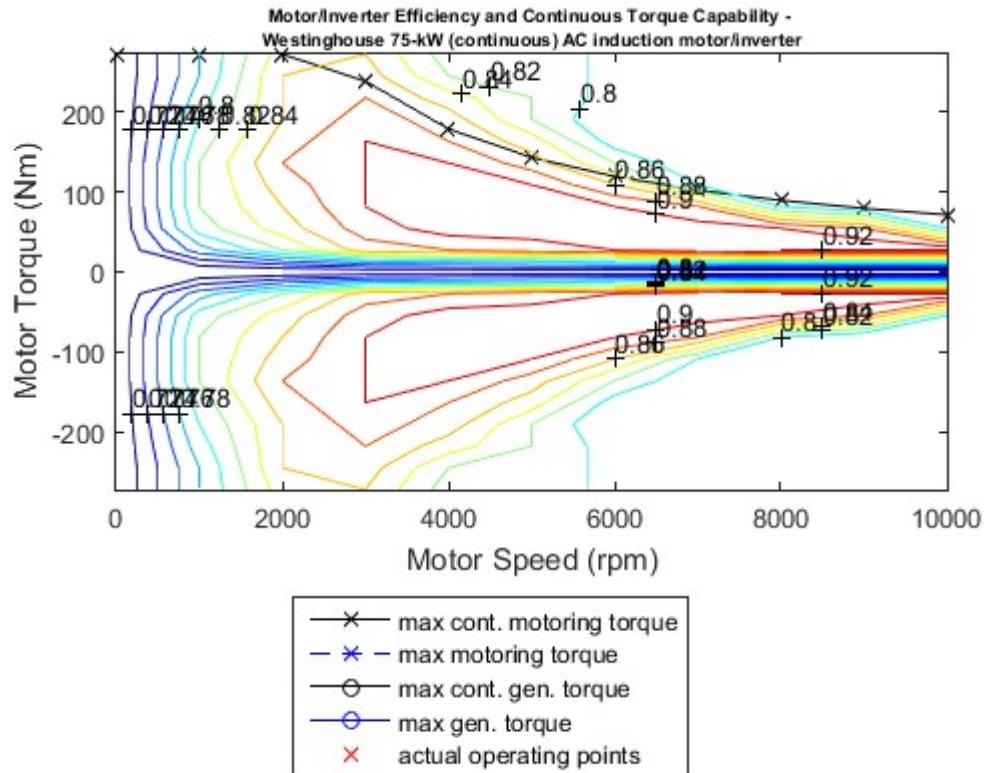


Diagrama de bloques del motor eléctrico

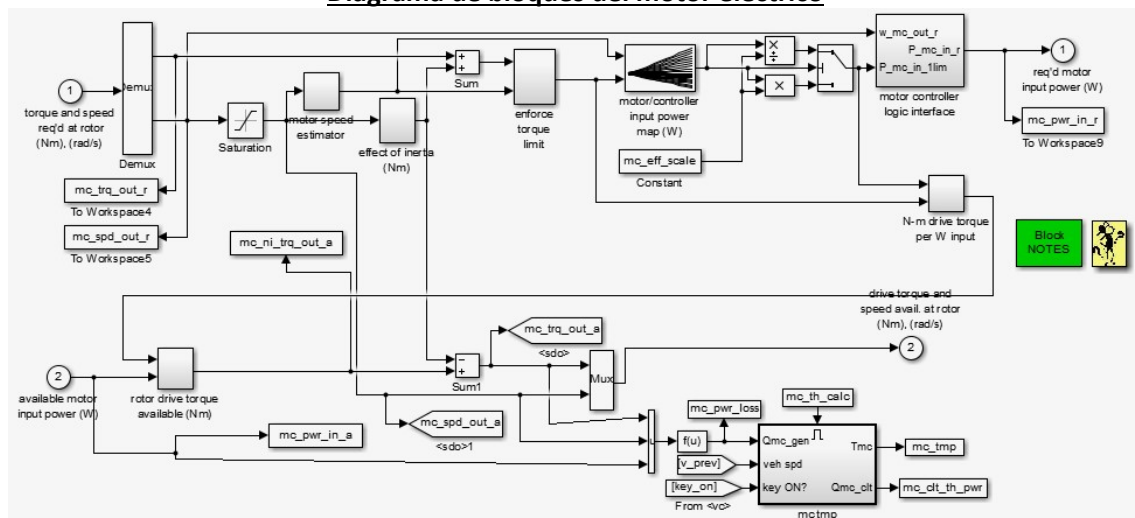


Figura 178: Gráfica del par motor (N*m) frente a su velocidad (rpm), junto a su diagrama de bloques.

Fuente: Obtenida a partir de "AdvisorAdvancedVehicle Simulator".

4.2.10.-Sistema de ruedas.

A la hora de realizar la simulación de dicho vehículo, se han empleado unas ruedas de tamaño estándar (diámetro de 58cm), apropiadas para un automóvil de este rango de dimensiones. Entre los diferentes modelos que ofrece el simulador, se han escogido unas ruedas regenerativas de tamaño equivalente a las de un Ford Focus, debido a que se adaptan a las dimensiones del presente vehículo. Los dispositivos regeneradores se encuentran situados junto a los frenos hidráulicos, siendo capaces de proporcionar hacia el sistema de baterías una potencia total de entre 15 y 20kW (Parámetros obtenidos de la ficha técnica del Ford Focus). En cuanto a las llantas modeladas, estas poseen una dimensión de 16 pulgadas.

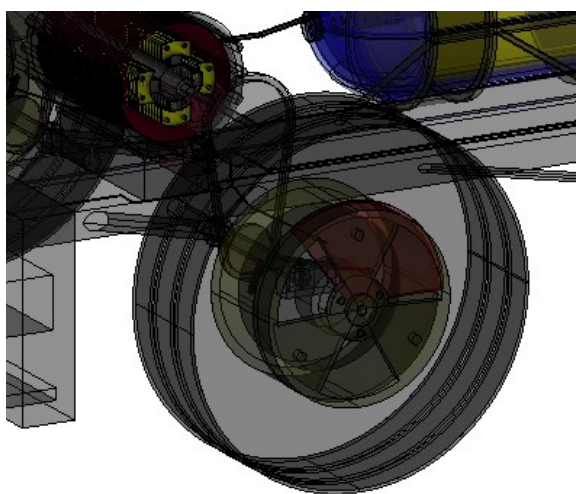


Figura 179: Rueda del vehículo modelada en auto CAD 3D.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

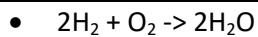
4.2.11.-Sistema de escape.

El sistema de escape empleado ha de ser el encargado de expulsar hacia el exterior el agua (H₂O) líquida generada tras la reacción, junto con el resto de gases contenidos en el aire ambiente, los cuales no han tomado parte durante la reacción, tales como el nitrógeno (N₂). Por lo tanto, para este sistema de conductos, se pueden emplear polímeros o aleaciones metálicas.

A su vez, de igual manera que se ha calculado la cantidad de oxígeno necesario para la reacción, se puede obtener la cantidad de agua (H₂O) generada.

Tabla 64: Cantidad de H₂O generado por el sistema.

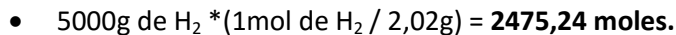
Partiendo de la reacción ideal, se obtienen los moles de hidrógeno (H₂) y de oxígeno (O₂) que tienen lugar.



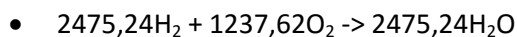
Moles de H₂: 2 moles.

Moles de O₂: 1 mol.

De acuerdo a la cantidad de hidrógeno (H₂) empleada, los 5kg, se pueden obtener los moles equivalentes, ya que como bien se estudió anteriormente su masa molar es de 2,02g/mol.



Tras conocer los moles de gas hidrógeno (H₂), se procede a ajustar la reacción.

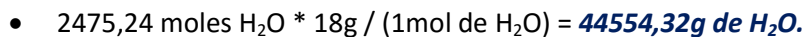


Moles de H₂: 2475,24 moles.

Moles de O₂: 1237,62 moles.

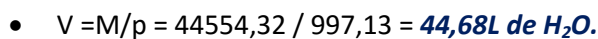
Moles de H₂O: 2475,24 moles.

Finalmente, debido a que la masa molar del agua (H₂O) es igual a 18g/mol, se puede obtener la masa de agua generada.

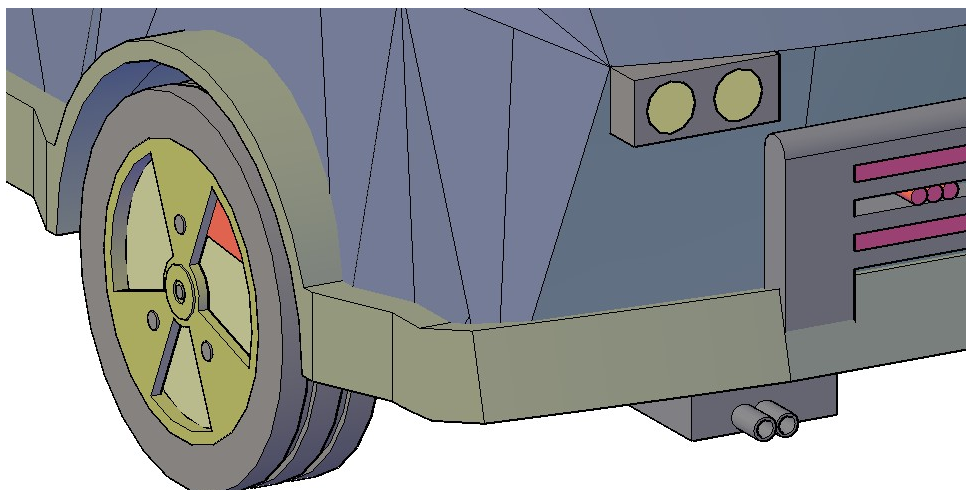


Suponiendo que estos 44,55kg de H₂O se encuentran a condiciones atmosféricas a la salida del conducto de escape, se puede calcular el volumen de agua (H₂O) generada en condiciones atmosféricas.

-Densidad (p) del agua (H₂O) a 25°C y 1 atm = 997,13g/l.



Como se puede verificar tras los cálculos anteriores, el vehículo es capaz de producir **44,68L de agua (H₂O)**. Uno de los inconvenientes del empleo de este tipo de vehículos, es el alto grado de humedad de los pavimentos debido a la expulsión continua de esta sustancia, a pesar de que no degrada al medio ambiente. Para ello, una posible opción consiste en la colocación de la salida por pare de este conducto, en la parte trasera del lateral derecho del automóvil.



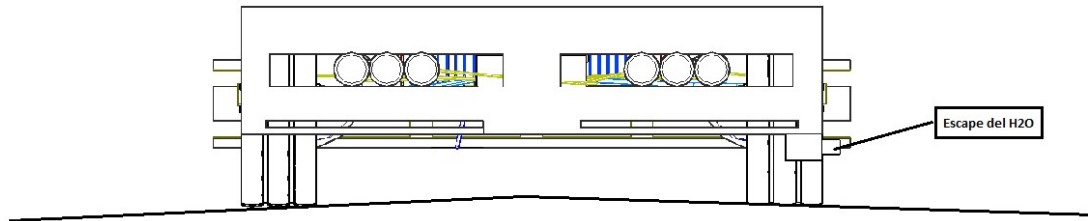


Figura 180: En la parte superior de la figura se observa el posicionamiento del sistema de escape (modelado en Auto CAD 3D) empleado en los vehículos de pila de hidrógeno, mientras que en la parte posterior se muestra la alternativas de posicionamiento lateral del sistema de escape.

Fuente: Esta figura ha sido realizada por el autor del presente estudio.

De esta manera, se aprovecha el bombeo y el peralte de las carreteras para conducir el agua (H₂O) hacia los laterales de la carretera con una mayor velocidad y así, mantener la zona central del pavimento libre de esta sustancia, evitando posibles accidentes por el exceso del líquido en el terreno.

4.2.12.-Componentes adicionales.

Para el resto de componentes del vehículo, tales como su sistema de alumbrado, los parabrisas, su sistema de escape, el sistema de aire acondicionado, el sistema de transmisión o el sistema de refrigeración entre otros componentes que posee un automóvil, se emplearán los parámetros proporcionados por el simulador para un transporte de estas características.

4.3.-Simulación mediante "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

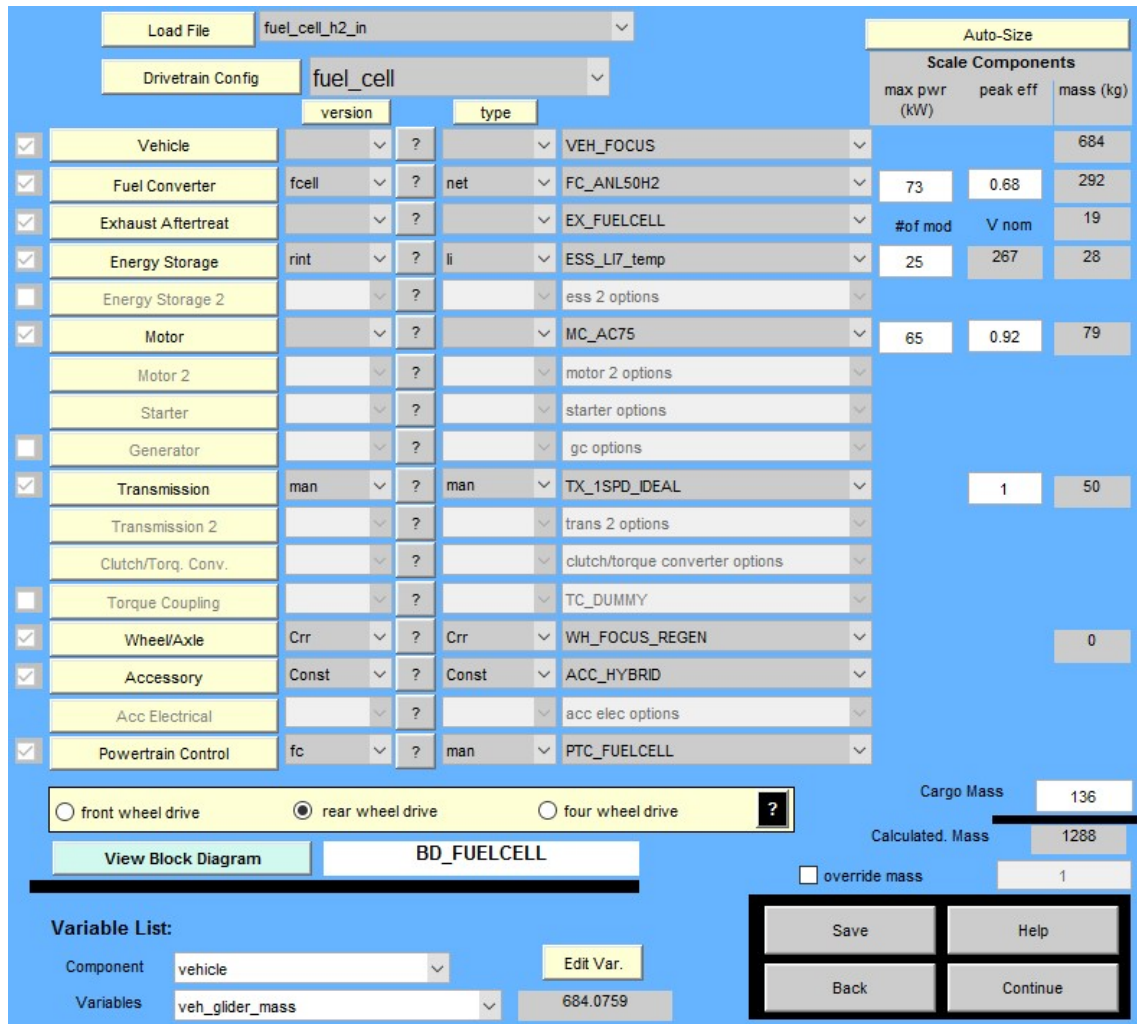
Una vez modelado el vehículo, junto con el cálculo de todos y cada uno de sus parámetros, se va proceder a introducir dichos valores en el simulador de Matlab, para poder obtener sus resultados. Para realizar la simulación se van a emplear un conjunto de ensayos con diferentes trayectorias y pendientes, para finalmente obtener la media aritmética de los resultados obtenidos en las diferentes situaciones. En un primer lugar, los datos a introducir para definir las propiedades del automóvil son los siguientes.

Tabla 65: Elementos a introducir en el simulador.

1. Se ha de seleccionar el sistema de celda de hidrógeno (H ₂).
2. Las dimensiones empleadas las de un Ford Focus.
3. Se ha de sustituir la masa del depósito que proporciona el simulador, por 2 depósitos de 2,5kg/unidad de H ₂ , dando un total de 5kg de H ₂ almacenado.
4. En el apartado de propiedades de la pila de combustible se introducen los resultados obtenidos (75kW y 68% y 292kg).
5. El sistema de almacenamiento empleado, se trata de baterías de ión Litio (Li), de 25kW, 267V y 28kg.

6. El motor empleado de acuerdo a los anteriores parámetros es un motor eléctrico de corriente alterna (65kW, 92% y 79kg).
7. La transmisión consiste en una transmisión ideal (50kg).
8. Se han empleado unas ruedas de un Ford Focus, tamaño estándar con frenos regeneradores (15-20kW).
9. Para el resto de accesorios se emplean los proporcionados por el simulador para un vehículo de celda de hidrógeno (H₂).
10. Se ha de seleccionar tracción sobre el eje posterior de acuerdo al modelo de Auto CAD 3D.
11. En el apartado de carga adicional sobre el vehículo, para realizar las simulaciones se ha introducido un valor estándar de 136kg, ya que es el que nos proporciona el simulador por defecto.

En la siguiente figura se muestran los datos una vez introducidos en el simulador.



The screenshot shows a software interface for configuring a vehicle drivetrain. The 'Drivetrain Config' dropdown is set to 'fuel_cell'. The 'Load File' is 'fuel_cell_h2_in'. The 'Auto-Size' section shows 'Scale Components' with columns for 'max pwr (kW)', 'peak eff', and 'mass (kg)'. The main configuration table lists various components with checkboxes, version/type dropdowns, and specific model selections. The 'Transmission' is set to 'man' and 'TX_1SPD_IDEAL'. The 'Motor' is 'MC_AC75'. The 'Wheel/Axle' is 'WH_FOCUS_REGEN'. The 'Accessory' is 'ACC_HYBRID'. The 'Powertrain Control' is 'PTC_FUELCELL'. The 'front wheel drive' radio button is selected. The 'Cargo Mass' is 136 kg, and the 'Calculated Mass' is 1288 kg. The 'View Block Diagram' button is labeled 'BD_FUELCELL'. The 'Variable List' shows 'veh_glider_mass' with a value of 684.0759. The bottom right has 'Save', 'Help', 'Back', and 'Continue' buttons.

Component	version	type	Model	max pwr (kW)	peak eff	mass (kg)
Vehicle	?		VEH_FOCUS			684
Fuel Converter	fcell	net	FC_ANL50H2	73	0.68	292
Exhaust Aftertreat			EX_FUELCELL	#of mod	V nom	19
Energy Storage	rint	li	ESS_Li7_temp	25	267	28
Energy Storage 2			ess 2 options			
Motor			MC_AC75	65	0.92	79
Motor 2			motor 2 options			
Starter			starter options			
Generator			gc options			
Transmission	man	man	TX_1SPD_IDEAL		1	50
Transmission 2			trans 2 options			
Clutch/Torq. Conv.			clutch/torque converter options			
Torque Coupling			TC_DUMMY			
Wheel/Axle	Crr	Crr	WH_FOCUS_REGEN			0
Accessory	Const	Const	ACC_HYBRID			
Acc Electrical			acc elec options			
Powertrain Control	fc	man	PTC_FUELCELL			

front wheel drive ☒ rear wheel drive ☐ four wheel drive ☐

Cargo Mass: 136
Calculated Mass: 1288
override mass: 1

Variable List:
Component: vehicle
Variables: veh_glider_mass 684.0759

Buttons: Save, Help, Back, Continue

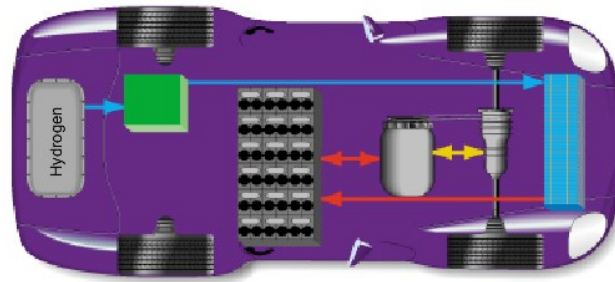


Figura 181: Datos del vehículo de celda de hidrógeno (H₂) modelado.

Fuente: Obtenida a partir de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

Tras haber introducido los parámetros en el programa, se va a proceder a continuación con los ensayos en diferentes condiciones, con la finalidad de obtener los resultados del vehículo propuesto.

1).-Test de aceleración: En un primer momento se va a realizar una simulación de la capacidad de aceleración y desaceleración del vehículo. Para ello, se han de insertar una serie de valores, en cuanto a las distancias y los periodos de tiempo, con los cuales la aplicación realizará el procedimiento. Dichos parámetros empleados se muestran a continuación.

- a) Tiempo transcurrido de 0 a 30km/h, debido a que es un rango medio en la puesta en marcha de cualquier vehículo.
- b) Tiempo transcurrido de 0 a 100km/h.
- c) Tiempo transcurrido de 100 a 120km/h, debido a que se trata del promedio de velocidades en una autovía.
- d) Distancia recorrida en 5 segundos, en simulación de la puesta en marcha.
- e) Tiempo en recorrer 100 metros.
- f) Aceleración máxima.
- g) Velocidad máxima capaz de alcanzar.
- h) Resto de parámetros por defecto.

Acceleration Test Advanced Options

Test Conditions

Basic Parameters	Units	Value
☒ Shift Delay	s	0.2

Enable/Disable Systems

☒ All Systems Enabled
☐ Energy Storage Disabled
☐ Fuel Converter Disabled

☒ Initial SOC	--	0.6

Mass Parameters

☒ Use Current Mass	kg	1275
☐ Override Vehicle Mass	kg	1275
☐ Add to Current Mass	kg	0

Test Results

Parameter	Initial Speed	Final Speed	Units
☒ Accel time #1	0	to 30	km/h
☒ Accel time #2	0	to 100	km/h
☒ Accel time #3	100	to 120	km/h

	Value	Units
☒ Distance in ...	5	s
☒ Time in ...	0.100	km
☒ Max accel rate		
☒ Max speed		

OK Cancel Help Defaults Load PNGV

Figura 182: Test de aceleración en el programa "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

Fuente: Obtenida a partir de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

Los resultados obtenidos han sido los siguientes.

Tabla 66: resultados tras el test de aceleración.

Tiempo de 0 a 30km/h, en segundos (s).	1,5
Tiempo de 0 a 100km/h, en segundos (s).	10,6
Tiempo de 100 a 120km/h, en segundos (s).	4,7
Máxima aceleración (m/s ²).	6,2
Distancia en 5s.	55
Tiempo en recorrer 0,1km.	7,2
Máxima velocidad capaz de alcanzar (km/h).	160

Tras haber realizado el ensayo de aceleración, en los siguientes apartados se va a someter al vehículo a tres recorridos con propiedades diferentes, para así observar de manera aproximada su comportamiento frente a condiciones reales.

2).-Test (Ciclo HWFET): En este segundo ensayo, se representa un ciclo de conducción en carretera, con la finalidad de obtener el consumo promedio de combustible. Consiste en un ensayo empleado por la EPA a la hora realizar dicho cálculo en los vehículos de pasajeros en los EE.UU. Las propiedades del recorrido se muestran a continuación.

Tabla 67: Parámetros del test HWFET.

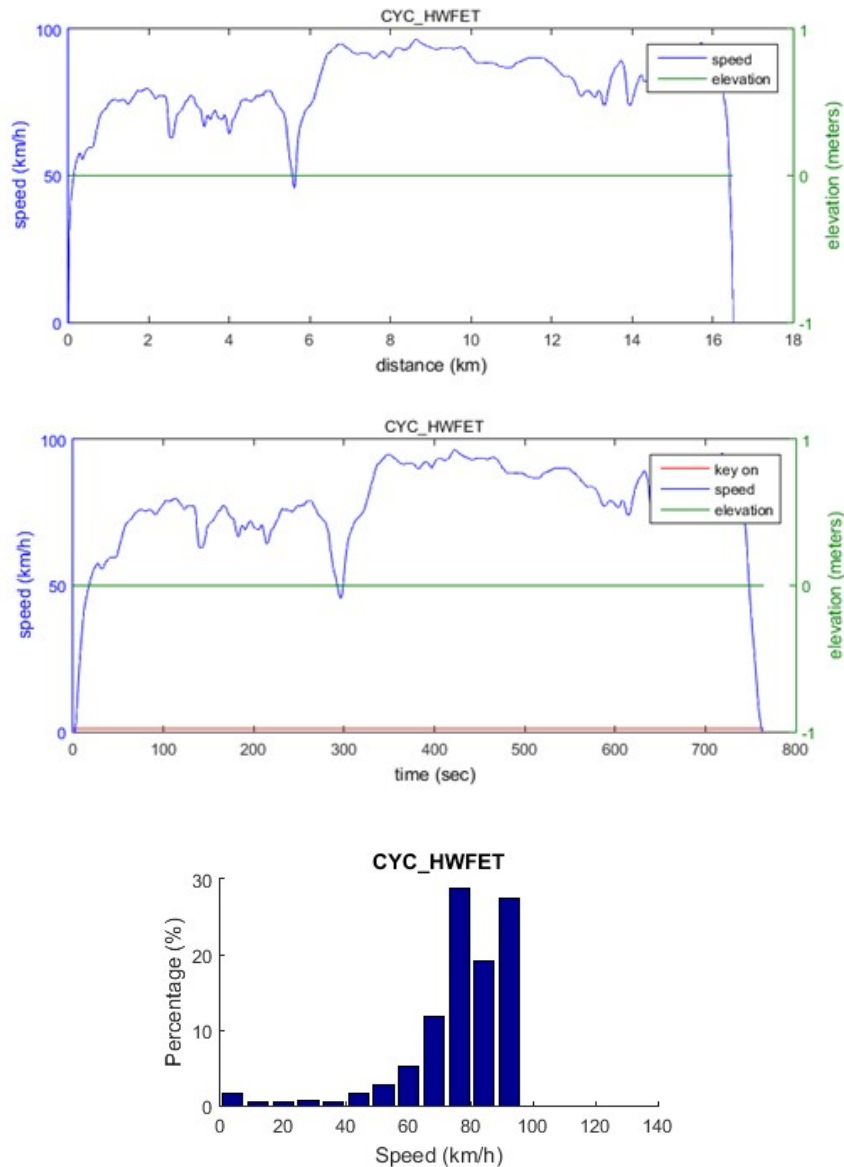


Figura 183: Gráficas que definen el primer ensayo (HWFET).

Fuente: Obtenida a partir de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

Procedimiento de prueba.	Test en el mundo real (Basado en estadísticas de la CARB).
Condiciones ambientales.	Condiciones atmosféricas.
Tiempo de prueba (s).	765
Distancia (m).	16,51
Máxima velocidad (km/h).	96,4
Velocidad media (km/h).	77,58
Máxima aceleración (m/s²).	1,43

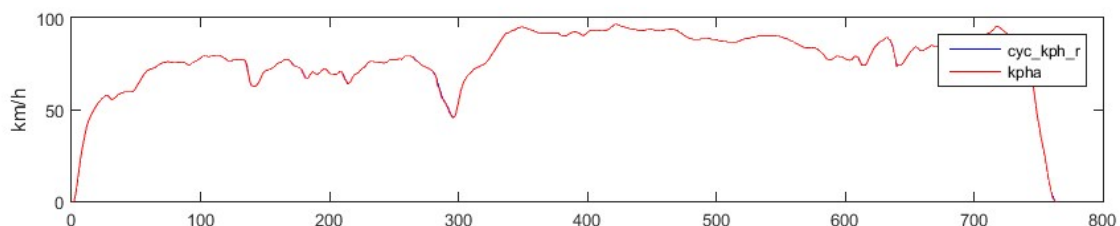
Máxima desaceleración (m/s ²).	-1,48
Aceleración media (m/s ²).	0,19
Desaceleración media (m/s ²).	-0,22
Tiempo total de inactividad (s).	6
Número de paradas.	1
Máxima pendiente ascendente (%).	0
Pendiente ascendente media (%).	0
Máxima pendiente descendente (%).	0
Pendiente descendente media (%).	0

Los resultados obtenidos tras el procedimiento anterior son los siguientes:

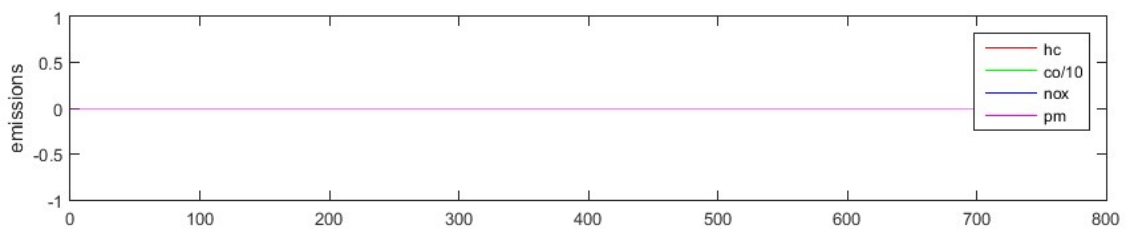
Tabla 68: Resultados del ensayo HWFET.

Consumo medio de H ₂ (kg/100km).	1,14
Consumo medio (L/100km). NOTA: En este apartado, el simulador realiza un cálculo aproximado en el consumo equivalente de gasolina cada 100 kilómetros.	1,9
Emisiones de combustible sin reaccionar (HC), en g/Km.	0
Emisiones de monóxido de carbono (CO), en g/Km.	0
Emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) en g/Km.	0
Emisiones de partículas (PM) en g/Km.	0
Emisiones de dióxido de carbono (CO ₂).	0
Tiempo de 0 a 30km/h, en segundos (s).	1,5
Tiempo de 0 a 100km/h, en segundos (s).	10,6
Tiempo de 100 a 120km/h, en segundos (s).	4,7
Máxima aceleración (m/s ²).	6,2
Distancia en 5s.	55
Tiempo en recorrer 0,1km.	7,2
Máxima velocidad capaz de alcanzar (km/h).	160

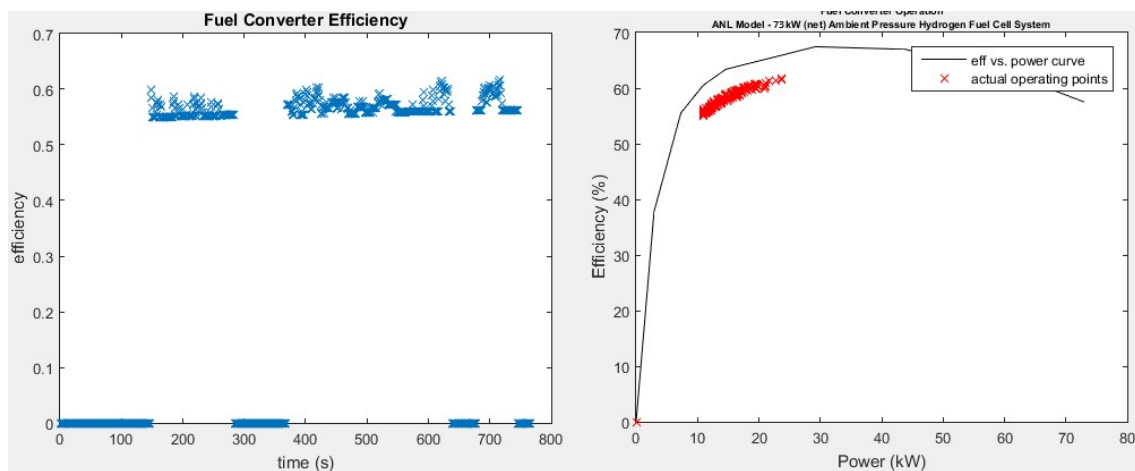
Velocidad (km/h) - Tiempo (s)



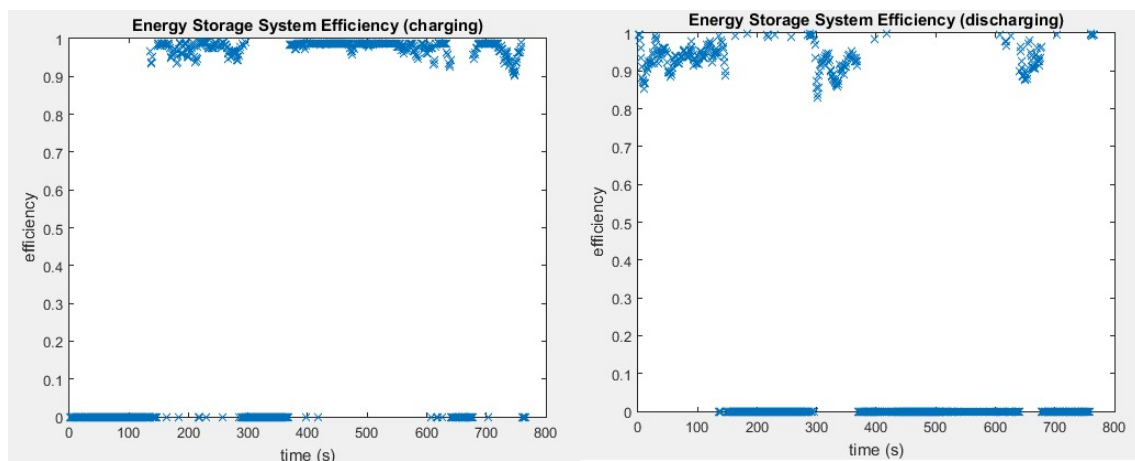
Emisiones (g/km) - Tiempo (s)



Eficiencia de la pila de combustible



Eficiencia de carga y descarga de las baterías (%) - Tiempo (s)



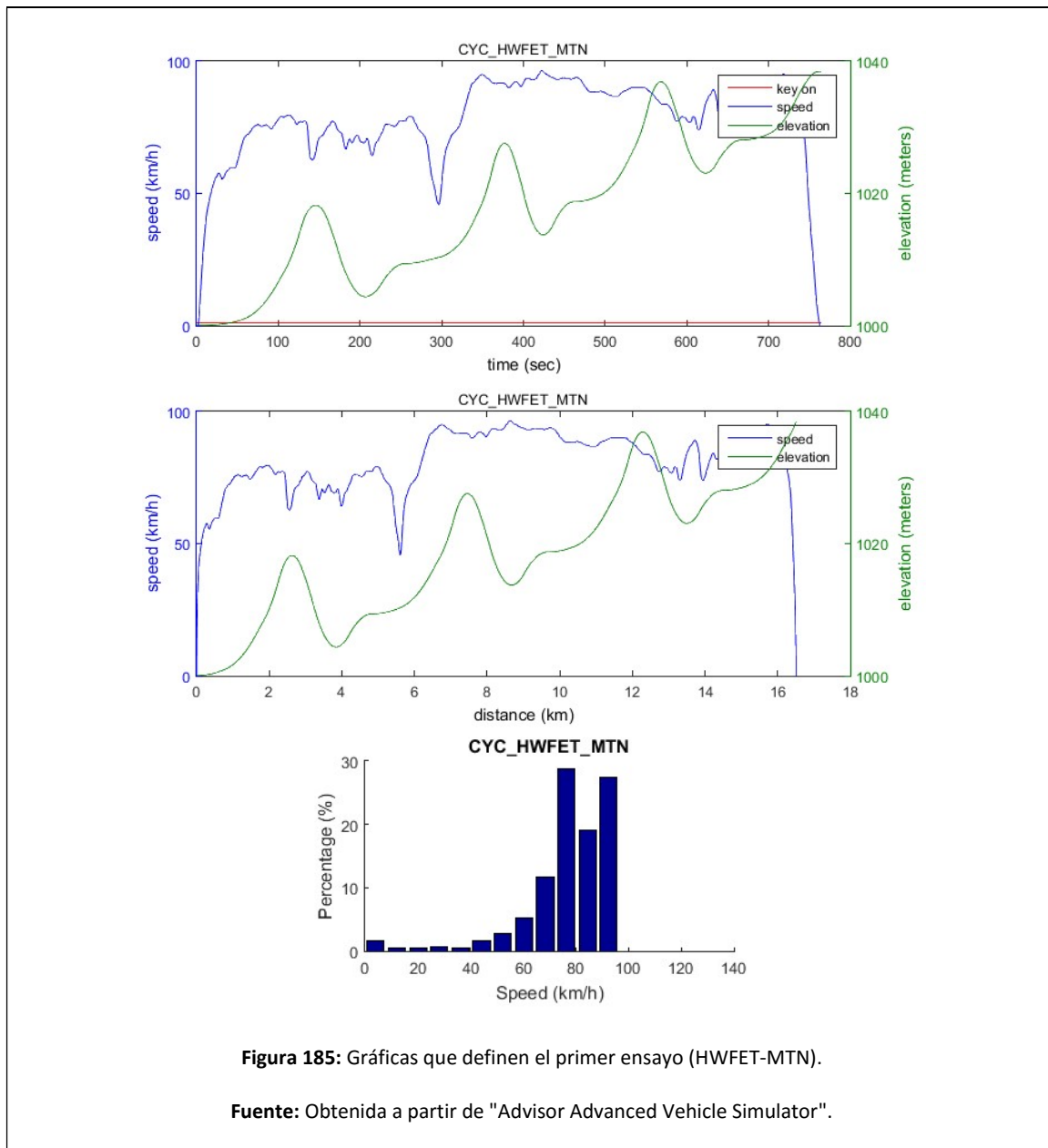
Figuras 184: Gráficas tras la simulación.

Fuente: Obtenida a partir de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

3).-Test (Ciclo HWFET-MTN): En este tercer ensayo, se representa un ciclo de conducción en carretera similar al anterior, con la finalidad de obtener el consumo promedio

de combustible. Consiste en un ensayo empleado por la EPA a la hora realizar dicho cálculo en los vehículos de pasajeros en los EE.UU. La principal diferencia respecto al primero es su variación de pendiente. Las propiedades del recorrido se muestran a continuación.

Tabla 69: Parámetros del test HWFET-MTN.



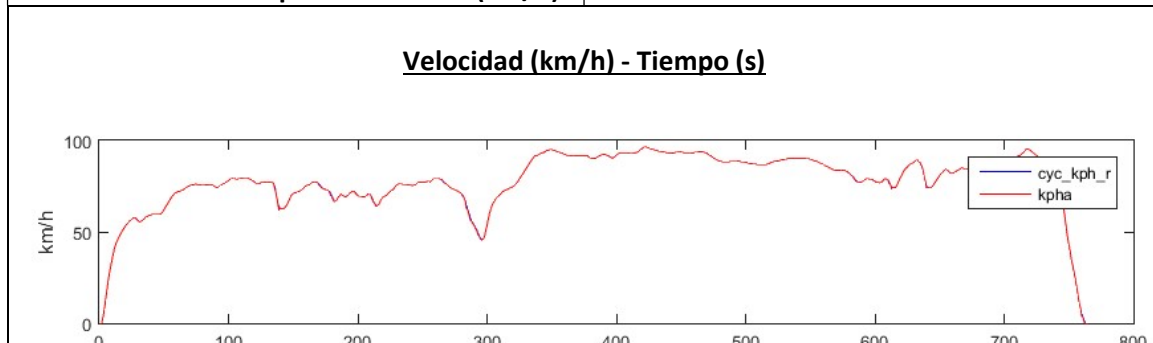
Procedimiento de prueba.	Test en el mundo real (Basado en estadísticas de la CARB).
Condiciones ambientales.	Condiciones atmosféricas.
Tiempo de prueba (s).	765
Distancia (m).	16,51

Máxima velocidad (km/h).	96,4
Velocidad media (km/h).	77,58
Máxima aceleración (m/s ²).	1,43
Máxima desaceleración (m/s ²).	-1,48
Aceleración media (m/s ²).	0,19
Desaceleración media (m/s ²).	-0,22
Tiempo total de inactividad (s).	6
Número de paradas.	1
Máxima pendiente ascendente (%).	2
Pendiente ascendente media (%).	0,6
Máxima pendiente descendente (%).	2
Pendiente descendente media (%).	1,1

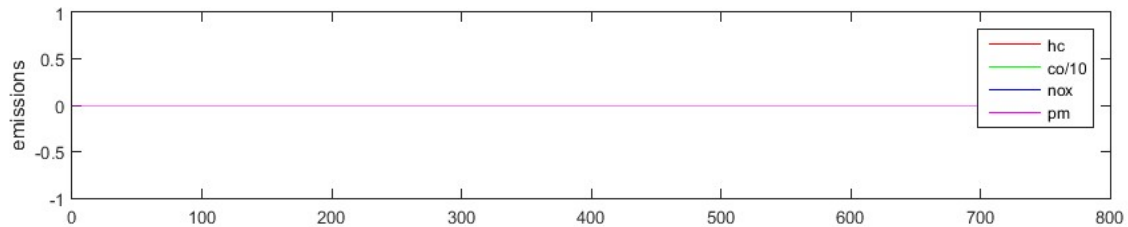
Los resultados obtenidos tras el procedimiento anterior son los siguientes:

Tabla 70: Resultados obtenidos tras el ensayo HWFET-MTN.

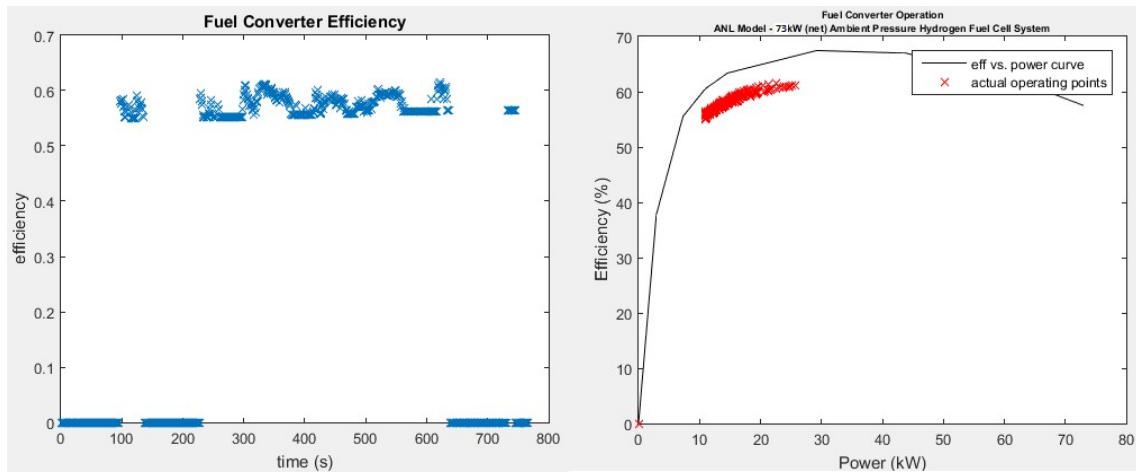
Consumo medio de H ₂ (kg/100km).	1,19
Consumo medio (L/100km). <i>NOTA:</i> En este apartado, el simulador realiza un cálculo aproximado en el consumo equivalente de gasolina cada 100 kilómetros.	2
Emisiones de combustible sin reaccionar (HC), en g/km.	0
Emisiones de monóxido de carbono (CO), en g/km.	0
Emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) en g/km.	0
Emisiones de partículas (PM) en g/km.	0
Emisiones de dióxido de carbono (CO ₂).	0
Tiempo de 0 a 30km/h, en segundos (s).	1,5
Tiempo de 0 a 100km/h, en segundos (s).	10,6
Tiempo de 100 a 120km/h, en segundos (s).	4,7
Máxima aceleración (m/s ²).	6,2
Distancia en 5s.	55
Tiempo en recorrer 0,1km.	7,2
Máxima velocidad capaz de alcanzar (km/h).	160



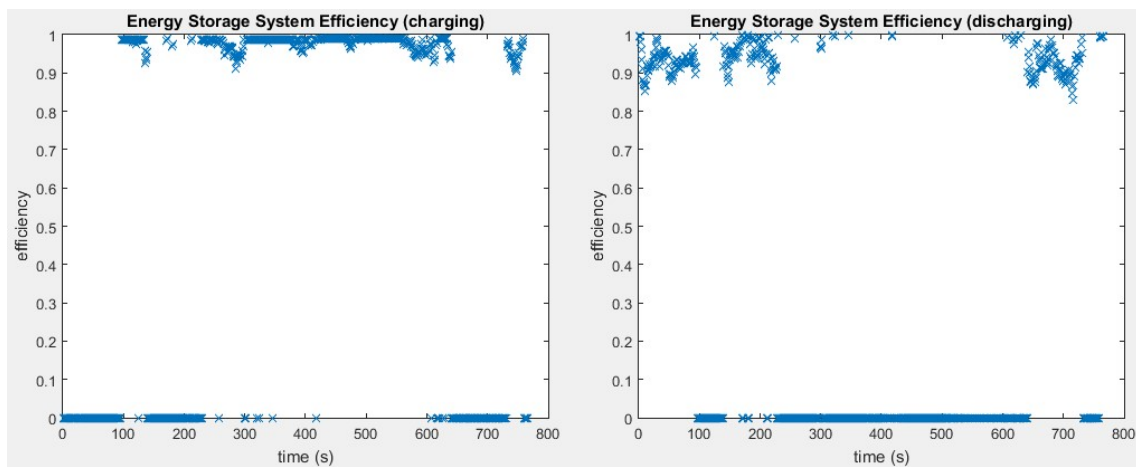
Emisiones (g/km) - Tiempo (s)



Eficiencia de la pila de combustible



Eficiencia de carga y descarga de las baterías (%) - Tiempo (s)



Figuras 186: Gráficas tras la simulación.

Fuente: Obtenida a partir de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

Tras haber completado los tres ensayos anteriores, se pueden obtener los promedios de sus parámetros. De acuerdo dichos promedios, se obtiene los siguientes resultados.

Tabla 71: Resultados promedios del vehículo de celda de hidrógeno (H₂).

Consumo medio de H₂ (kg/100km).	1,16
Consumo medio (L/100km). <u>NOTA:</u> En este apartado, el simulador realiza un cálculo aproximado en el consumo equivalente de gasolina cada 100 kilómetros.	2
Autonomía respecto al consumo anterior (km).	431
Emisiones de combustible sin reaccionar (HC), en g/km.	0
Emisiones de monóxido de carbono (CO), en g/km.	0
Emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) en g/km.	0
Emisiones de partículas (PM) en ppm.	0
Emisiones de dióxido de carbono (CO₂).	0
Tiempo de 0 a 30km/h, en segundos (s).	1,5
Tiempo de 0 a 100km/h, en segundos (s).	10,6
Tiempo de 100 a 120km/h, en segundos (s).	4,7
Máxima aceleración (m/s²).	6,2
Distancia en 5s.	55
Tiempo en recorrer 0,1km.	7,2
Máxima velocidad capaz de alcanzar (km/h).	160

Una vez concluida la simulación del vehículo anteriormente modelado, se va continuar con la comparación de los automóviles de celda de hidrógeno (H₂) frente a los de combustible convencional. Para ello, se van a realizar simulaciones con una serie de combustibles y sistemas de propulsión convencionales, los cuales poseen potencias similares. Para realizar dicho cometido, y proceder con la comparación, se han de emplear los mismos ensayos escogidos para el vehículo de hidrógeno (H₂), es decir el de aceleración, el test HWFET y el test HWFET-MTN.

A su vez, se realizará un análisis de los vehículos que posean potencia similar a los anteriores, de mayor uso en los pasados años a través de la Asociación Nacional de Importadores de Automóviles, Camiones, Autobuses y Motocicletas (ANIACAM). A continuación se emplearán los datos oficiales de consumos y emisiones generadas por dichos automóviles, los cuales han sido publicados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

Dicha entidad, para realizar el cálculo de los consumos cada 100 km, emplea un ciclo de conducción que incluye 4km sobre tráfico urbano a una velocidad máxima de 50km/h, junto con otros 7km en carretera, alcanzando una velocidad de 120km/h.

Además, para las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), emplea las declaradas por los fabricantes, las cuales son medidas de acuerdo al procedimiento normalizado para los vehículos en Europa. El presente organismo, toma en cuenta que los motores de gasolina emiten 2,3 kg de dicho gas por cada litro de gasolina, mientras que los diesel 2,6 kg por cada litro empleado.

De acuerdo a los dos parámetros anteriores, realiza una clasificación energética, en la cual los vehículos de clase **A, B, C** son de una elevada eficiencia energética; los de clase **D** pertenecen a un valor medio y los de clase **E, F, G** poseen una baja eficiencia energética. Para el presente estudio, se han escoger automóviles de clase **A**, ya que se trata de los más respetuosos frente al medio ambiente.

En cuanto a las emisiones del resto de gases y partículas contaminantes, se ha de tener en cuenta que los resultados obtenidos se encuentren dentro de los rangos permitidos por la vigente legislación Europea (Euro VI, de Septiembre de 2014). Para la comprobación de dichas emisiones, la normativa emplea un circuito estándar (NEDC), con el cual se simulan unas condiciones de circulación que combinan cuatro tramos de conducción urbana (ECE15) con otro extraurbano (EUDC). De esta manera se logra un total de 11,027km y una duración de aproximadamente 20 minutos, empleando una velocidad media de 33,6 km/h y un tiempo a ralentí de 300 segundos.

4.4.-Vehículo de combustión interna con ignición por chispa (Ciclo Otto).

En este segundo apartado, se ha simulado un vehículo de gasolina con potencia media (65kW), mediante los mismos ensayos empleados anteriormente, a partir de los cuales se ha realizado la media aritmética de sus parámetros, para así poder obtener las propiedades promedias de un vehículo de estas características. A su vez, se ha añadido una tabla que muestra algunos vehículos de gasolina con potencia similar, que se encuentran catalogados en un rango de alta eficiencia, de acuerdo al IDAE.

Tabla 72: Valores promedios del vehículo de gasolina.

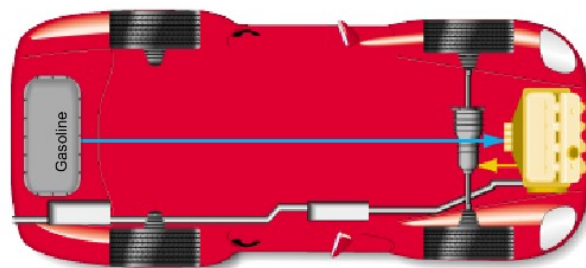


Figura 187: Esquema de un sistema de propulsión un vehículo con motor de combustión interna de ignición por chispa.

Fuente: Obtenida a partir de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

Parámetros del vehículo de gasolina

Load File		Small_car_in		Auto-Size	
Drivetrain Config		conventional		Scale Components	
	version	type	max pwr (kW)	peak eff	mass (kg)
☒ Vehicle	?	VEH_FOCUS			681
☒ Fuel Converter	ic	si	65	0.34	207
☒ Exhaust Aftertreat	?	EX_SI	#of mod	V nom	17
☐ Energy Storage	?	ess options			
☐ Energy Storage 2	?	ess 2 options			
☐ Motor	?	MC_AC124_EV1_draft			
☐ Motor 2	?	motor 2 options			
☐ Starter	?	starter options			
☐ Generator	?	gc options			
☒ Transmission	man	man	1		114
☐ Transmission 2	?	trans 2 options			
☐ Clutch/Torq. Conv.	?	clutch/torque converter options			
☐ Torque Coupling	?	TC_DUMMY			
☒ Wheel/Axle	Crr	Crr			0
☒ Accessory	Const	Const			
☐ Acc Electrical	?	acc elec options			
☒ Powertrain Control	conv	man			

☐ front wheel drive
 ☒ rear wheel drive
 ☐ four wheel drive
 ?

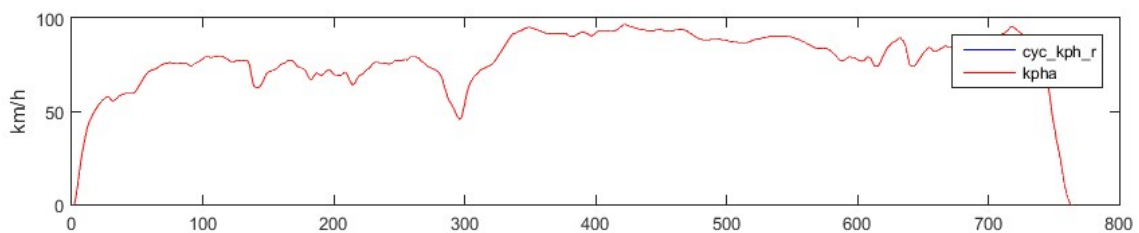
Variable List:
 Component: fuel_converter
 Variables: fc_acc_mass 50.1352

Cargo Mass: 136
 Calculated. Mass: 1155
☐ override mass 1

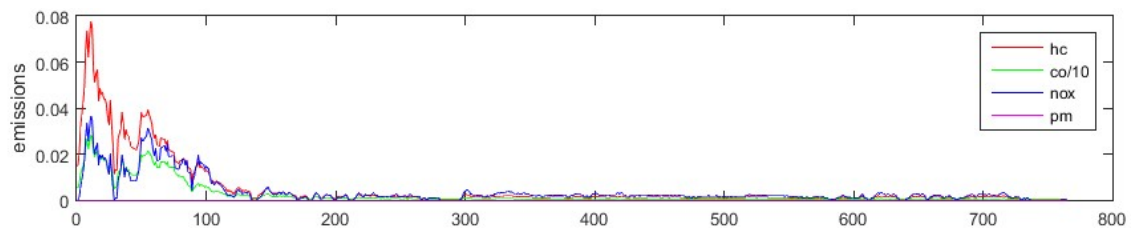
Vehículo.	Automóvil impulsado por gasolina.
Potencia media (kW)	65
Tipo de motor.	Motor de combustión interna de ignición por chispa (Ciclo Otto), de 65kW.
Alimentación.	Gasolina.
Capacidad del depósito (L)	46
Consumo medio de gasolina (L/100km).	5,2
Masa de vehículo con carga añadida (kg).	1155
Emisiones máximas de combustible sin reaccionar (HC), en g/km. - (0,1 g/km permitidos).	0,079
Emisiones máximas de monóxido de carbono (CO), en g/km. - (1 g/km permitidos).	0,32
Emisiones máximas de óxidos de nitrógeno (NOx) en g/km. - (0,06 g/km permitidos).	0,039
Emisiones máximas de partículas (PM) en ppm. - (0,005 g/km permitidos).	0,0034
Emisiones promedias de dióxido de carbono (CO₂) en g/km. - (135 g/km permitidos).	112

Tiempo de 0 a 30km/h, en segundos (s).	1,6
Tiempo de 0 a 100km/h, en segundos (s).	9,9
Tiempo de 100 a 120km/h, en segundos (s).	4,4
Máxima aceleración (m/s ²).	5,7
Distancia en 5s.	55,4
Tiempo en recorrer 0,4km.	17
Máxima velocidad capaz de alcanzar (km/h).	190

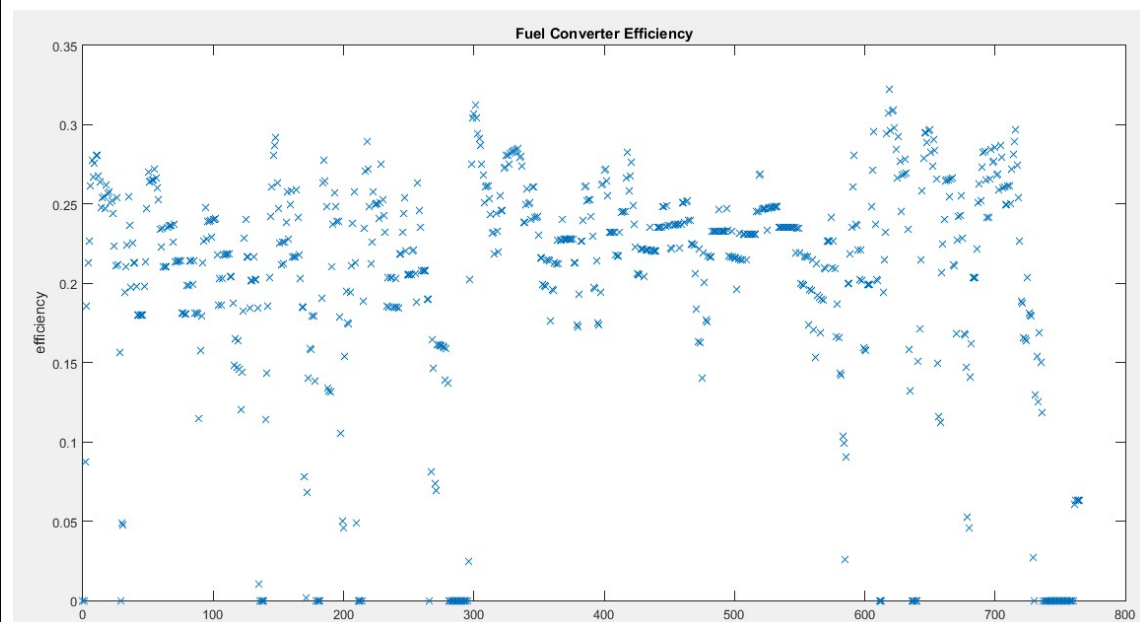
Velocidad (km/h) - Tiempo (s)



Emisiones (g/km) - Tiempo (s)



Eficiencia del motor (%) - Tiempo (s)



Ejemplos de vehículos de gasolina con potencia media de elevada eficiencia (IDAE).

Listado de Vehículos Seleccionados por el Usuario				
Modelo	Consumo (l/100km)	Emisiones (gCO ₂ /km)	Clasificación	Eliminar
Opel CORSA 1.4 90 cv M5 3P	5,2	120		☐
Opel CORSA 1.4 90 cv M5 5P (Neumático de BRR)	5,1	118		☐
Opel CORSA 1.4 MTA Start & Stop 90 cv 3P	4,8	112		☐
Opel CORSA 1.4 MTA Start & Stop 90 cv 5P (Neumático de BRR)	4,7	110		☐
Renault Clio IV - 5 puertas TCe 90cv SIN Stop&Start	4,9	114		☐
Renault Clio IV Sport Tourer Energy TCe 90cv eco2 Euro 6	4,7	105		☐
Renault Clio IV Sport Tourer Energy TCe 90cv Stop&Start	4,5	105		☐
SEAT IBIZA MY15 1.2 TSI MAN. 5V 85 CV	5,1	119		☐
SEAT IBIZA MY16 1.2 TSI MAN. 90 CV PK66	4,9	116		☐
SEAT IBIZA ST MY16 1.2 TSI MAN. 90 CV PK66	4,9	116		☐
Volkswagen POLO MY16 1.2 TSI AUT. 7V 90 CV PK61	4,7	109		☐
Volkswagen POLO MY16 1.2 TSI AUT. 7V 90 CV PK67	4,6	107		☐
Volkswagen POLO MY16 1.2 TSI MAN. 5V 90 CV CROSS PK66	4,8	110		☐

Página 1 de 1

4.5.-Vehículo de combustión interna de ignición por compresión (Ciclo Diesel).

En este segundo apartado, se ha simulado un vehículo de gasóleo con potencia media (65kW), mediante los mismos ensayos empleados anteriormente, a partir de los cuales se ha realizado la media aritmética de sus parámetros, para así poder obtener las propiedades promedias de un vehículo de estas características. A su vez, se ha añadido una tabla que muestra algunos vehículos de gasóleo con potencia similar, que se encuentran catalogados en un rango de alta eficiencia, de acuerdo al IDAE.

Tabla 72: Valores promedios del vehículo de gasóleo.

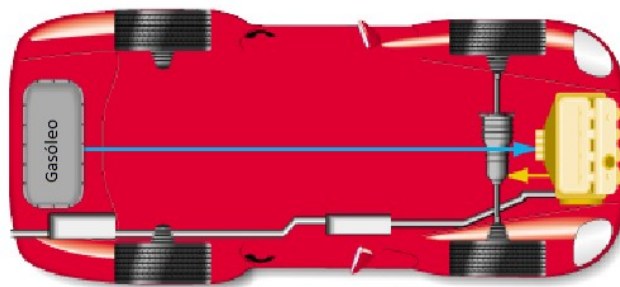


Figura 188: Esquema de un sistema de propulsión un vehículo con motor de combustión interna de ignición por compresión.

Fuente: Obtenida a partir de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

Parámetros del vehículo de gasóleo

Load File		conv_ci_in		Auto-Size		
Drivetrain Config		conventional		Scale Components		
	version	?	type	max pwr (kW)	peak eff	mass (kg)
☒	Vehicle		?	VEH_FOCUS		681
☒	Fuel Converter	ic	?	ci	FC_CI67_emis	65
☒	Exhaust Aftertreat		?		EX_CI	0.4
☐	Energy Storage		?		ess options	19
☐	Energy Storage 2		?		ess 2 options	
☐	Motor		?		MC_AC124_EV1_draft	
	Motor 2		?		motor 2 options	
	Starter		?		starter options	
☐	Generator		?		gc options	
☒	Transmission	auto	?	auto	TX_AUTO4_IDEAL	1
	Transmission 2		?		trans 2 options	114
	Clutch/Torq. Conv.		?		clutch/torque converter options	
☐	Torque Coupling		?		TC_DUMMY	
☒	Wheel/Axle	Crr	?	Crr	WH_SMCAR_IDEAL	0
☒	Accessory	Const	?	Const	ACC_CONV	
	Acc Electrical		?		acc elec options	
☒	Powertrain Control	conv	?	auto	PTC_CONVAT	

☐ front wheel drive
 ☒ rear wheel drive
 ☐ four wheel drive
 ?

View Block Diagram **BD_CONVAT**

Variable List:

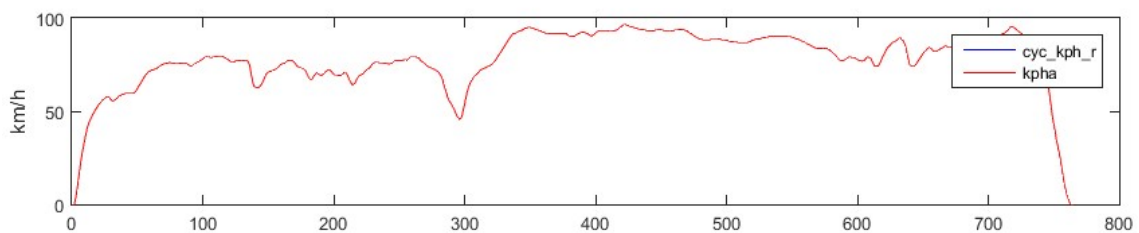
Component	Variables	Edit Var.
fuel_converter	fc_acc_mass	53.7694

☒ override mass
 Cargo Mass: 136
Calculated. Mass: 1159
1605

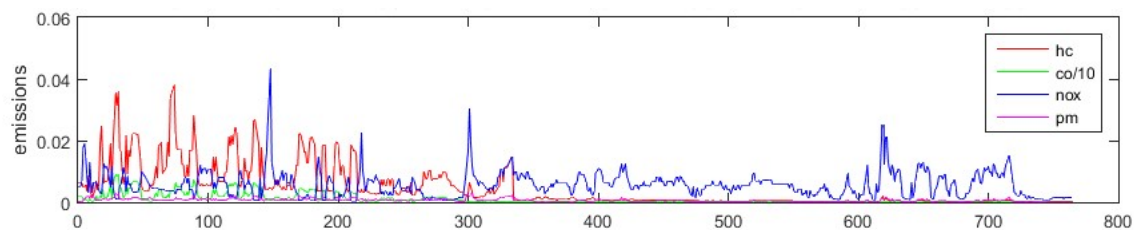
Vehículo.	Automóvil impulsado por gasóleo.
Potencia (kW)	65.
Tipo de motor.	Motor de combustión interna de ignición por compresión (Ciclo Diesel), de 65kW.
Alimentación.	Gasóleo-diesel.
Masa con carga añadida (kg).	1159
Capacidad del depósito (L)	45
Consumo medio de gasóleo (L/100km).	4,8
Emisiones máximas de combustible sin reaccionar (HC), en g/km.	0,039
Emisiones máximas de monóxido de carbono (CO), en g/km. - (0,5 g/km permitidos).	0,11
Emisiones máximas de óxidos de nitrógeno (NOx) en g/km. - (0,08 g/km permitidos).	0,043
Emisiones máximas de partículas (PM) en ppm. - (0,005 g/km permitidos).	0,0046
Emisiones promedias de dióxido de carbono (CO₂) en g/km. - (135 g/km permitidos).	99

Tiempo de 0 a 30km/h, en segundos (s).	1,9
Tiempo de 0 a 100km/h, en segundos (s).	10,1
Tiempo de 100 a 120km/h, en segundos (s).	4,8
Máxima aceleración (m/s ²).	6,1
Distancia en 5s.	48,1
Tiempo en recorrer 0,4km.	19,5
Máxima velocidad capaz de alcanzar (km/h).	182

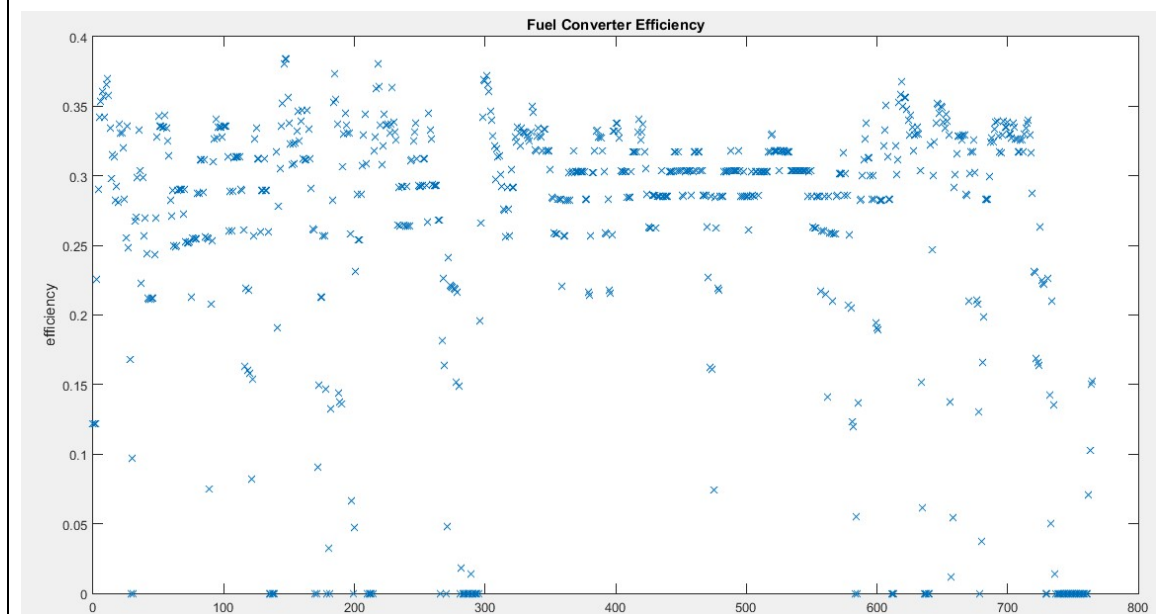
Velocidad (km/h) - Tiempo (s)



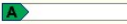
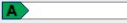
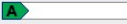
Emisiones (g/km) - Tiempo (s)



Eficiencia del motor (%) - Tiempo (s)



Ejemplos de vehículos de gasóleo de elevada eficiencia (IDAE).

Listado de Vehículos Seleccionados por el Usuario				
Modelo	Consumo (l/100km)	Emisiones (gCO ₂ /km)	Clasificación	Eliminar
Nissan Note Nissan Note 1.5dCi 90CV 2WD MT EURO6	3,6	93		☐
Nissan NUEVO NOTE 5p 1.5dCi 90CV (66kW)	3,6	92		☐
Peugeot 2008 1.6 eHDi 92 CMP (98q)	3,8	98		☐
Peugeot 207 5P 98G 1.6 HDI 92 FAP	3,8	98		☐
Peugeot 207 5P 99G 1.6 HDI 90 FAP	3,8	99		☐
Renault Captur Energy dCi 90cv Ecoleader Euro 6	3,6	95		☐
Renault Captur Energy dCi 90cv EDC Euro 6	3,8	99		☐
Renault Clio IV - 5 puertas dCi 90cv EDC	3,7	95		☐
Renault Clio IV - 5 puertas Energy dCi 90cv Ecoleader Euro 6	3,3	85		☐
Renault Clio IV - 5 puertas Energy dCi 90cv S&S Ecoleader	3,1	82		☐
SEAT IBIZA MY16 1.4 TDI AUT. 7V 90 CV PK61	3,7	97		☐
SEAT IBIZA MY16 1.4 TDI MAN. 90 CV PK61	3,7	95		☐
SEAT IBIZA ST MY16 1.4 TDI AUT. 7V 90 CV PK61	3,8	99		☐

Página 1 de 1

4.7.-Vehículo híbrido eléctrico.

En este último apartado, se han utilizado una serie de modelos de potencia media (63-73kW) de elevado uso a día de hoy, a partir de los cuales se realizará la media aritmética de sus parámetros, para así poder obtener las propiedades promedias de un vehículo de estas características.

Tabla 73: Valores promedios del vehículo híbrido.

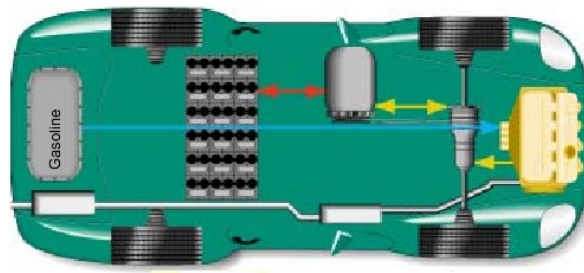


Figura 189: Esquema de un sistema de propulsión un vehículo híbrido con motor de combustión interna de ignición por chispa.

Fuente: Obtenida a partir de "Advisor Advanced Vehicle Simulator".

Parámetros del vehículo híbrido.

Load File: PARALLEL_defaults_in

Drivetrain Config: parallel

Auto-Size

		version	type		max pwr (kW)	peak eff	mass (kg)
☒	Vehicle	?		VEH_FOCUS			763
☒	Fuel Converter	ic	?	si	FC_SI63_emis	40	0.34
☒	Exhaust Aftertreat		?		EX_SI	#of mod	V nom
☒	Energy Storage	rint	?	li	ESS_Li7_temp	25	267
☐	Energy Storage 2		?		ess 2 options		
☒	Motor		?		MC_AC62	30	0.9
	Motor 2		?		motor 2 options		
	Starter		?		starter options		
☐	Generator		?		gc options		
☒	Transmission	man	?	man	TX_5SPD_SI	1	114
	Transmission 2		?		trans 2 options		
	Clutch/Torq. Conv.		?		clutch/torque converter options		
☒	Torque Coupling		?		TC_DUMMY	1	
☒	Wheel/Axle	Crr	?	Crr	WH_FOCUS_REGEN		0
☒	Accessory	Const	?	Const	ACC_HYBRID		
	Acc Electrical		?		acc elec options		
☒	Powertrain Control	par	?	man	PTC_PAR		

front wheel drive ☐ rear wheel drive ☒ four wheel drive ☐ ?

View Block Diagram: BD_PAR

Cargo Mass: 136

Calculated. Mass: 1227

☐ override mass: 1

Variable List:

Component: vehicle

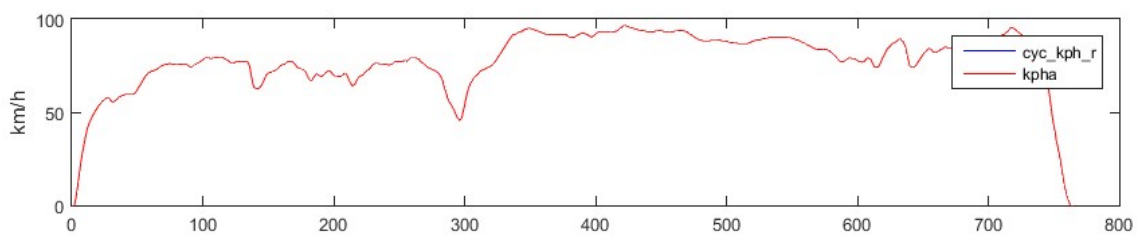
Variables: veh_glider_mass 763

Buttons: Save, Help, Back, Continue

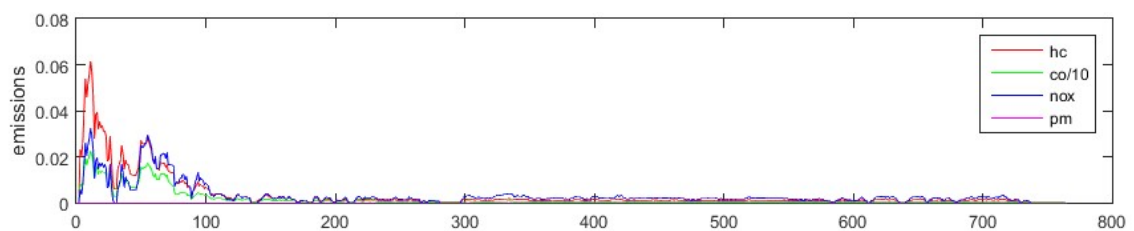
Vehículo.	Automóvil híbrido.
Potencia media (kW)	70kW
Tipo de motor.	-Motor de combustión interna de ignición por chispa (Ciclo Otto), de 40kW. -Motor de corriente alterna de 30kW.
Alimentación.	Gasolina.
Capacidad del depósito (L)	36.
Consumo medio de gasolina (L/100km).	4,3
Masa de vehículo con carga añadida (kg).	1227
Emisiones máximas de combustible sin reaccionar (HC), en g/km. - (0,1 g/km permitidos).	0,058
Emisiones máximas de monóxido de carbono (CO), en g/km. - (1 g/km permitidos).	0,21
Emisiones máximas de óxidos de nitrógeno (NOx) en g/km. - (0,06 g/km permitidos).	0,032
Emisiones máximas de partículas (PM) en ppm. - (0,005 g/km permitidos).	0,001
Emisiones promedias de dióxido de carbono	88

(CO ₂) en g/km. - (135 g/km permitidos).	
Tiempo de 0 a 30km/h, en segundos (s).	2,1
Tiempo de 0 a 100km/h, en segundos (s).	10,4
Tiempo de 100 a 120km/h, en segundos (s).	4,2
Máxima aceleración (m/s ²).	4,1
Distancia en 5s.	48,1
Tiempo en recorrer 0,4km.	17,4
Máxima velocidad capaz de alcanzar (km/h).	185

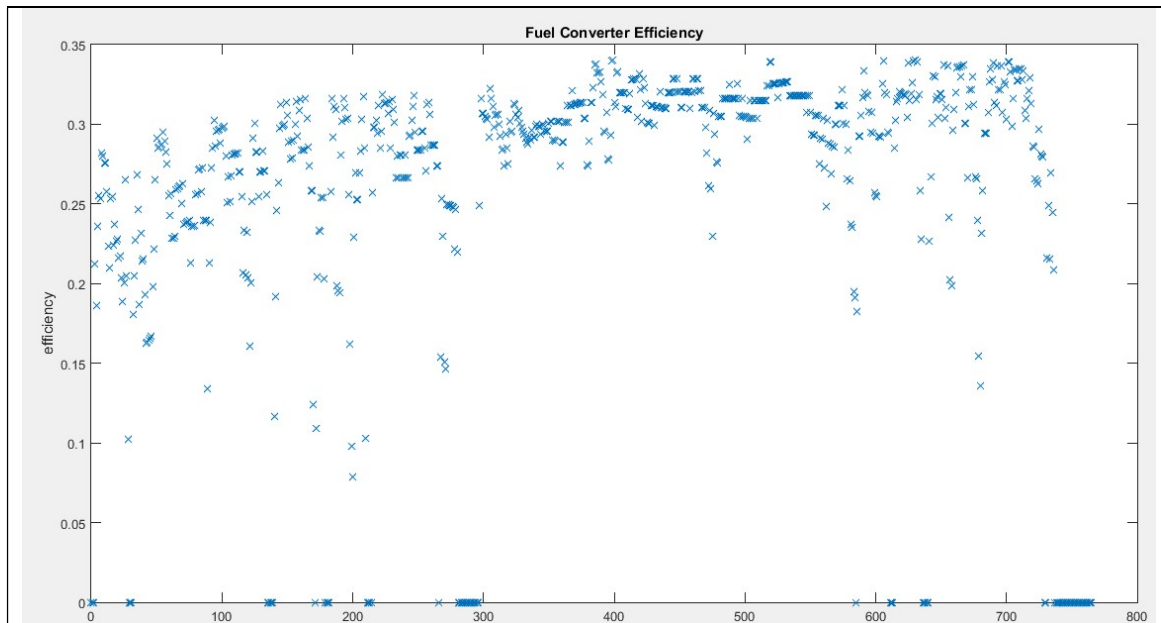
Velocidad (km/h) - Tiempo (s)



Emisiones (g/km) - Tiempo (s)



Eficiencia del motor de combustión (%) - Tiempo (s)



Ejemplos de vehículos híbridos con potencia media de elevada eficiencia (IDAE).

Modelo	Consumo (l/100km)	Emisiones (gCO ₂ /km)	Clasificación	Comparar
Toyota Canarias Prius (F5) 1.8 CVT Aqua	3,6	84		☒
Toyota Canarias Prius (F5) 1.8 CVT Aire	3,6	84		☒
Toyota Canarias Prius (F5) 1.8 CVT Pro	3,3	76		☒
Modelo	Consumo (l/100km)	Emisiones (gCO ₂ /km)	Clasificación	Comparar
Toyota AURIS Touring Sport Hybrid neumático 15p (MY 2015)	3,6	83		☒
Toyota AURIS Touring Sport Hybrid neumático 15p ECO (MY 2015)	3,5	81		☒
Toyota AURIS Touring Sport Hybrid neumático 16p (MY 2015)	3,6	83		☒
Modelo	Consumo (l/100km)	Emisiones (gCO ₂ /km)	Clasificación	Comparar
Lexus CT 200h neumáticos 15p (MY 2015)	3,6	82		☒
Lexus CT 200h neumáticos 15p (MY 2016)	3,6	82		☒

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.-RESULTADOS.

Finalmente, tras haber obtenido los diferentes parámetros para cada sistema de propulsión en un vehículo de potencia media (60-75kW), se va a proceder a comparar cada uno de dichos sistemas con el mecanismo de pila de hidrógeno (H₂), indicando tanto sus ventajas como sus desventajas.

Tabla 74: Comparación de los diferentes vehículos.

	<i>Vehículo con ciclo Otto.</i>	<i>Vehículo de ciclo Diesel</i>	<i>Vehículo híbrido eléctrico.</i>	<i>Vehículo de celda de hidrógeno (H₂).</i>
Potencia (kW).	65.	65.	70.	65.
Tipo de motor.	Motor de combustión interna de ignición por chispa (Ciclo Otto).	Motor de combustión interna de ignición por compresión (Ciclo Diesel).	Sistema híbrido que combina un motor de combustión interna de ignición por chispa (40kW), con un motor eléctrico de corriente alterna (30kW).	Sistema de pila de combustible polimérica (73kW), la cual alimenta a un motor eléctrico de corriente alterna de 65KW.
Alimentación.	Gasolina.	Gasóleo diesel.	Gasolina.	Hidrógeno gaseoso (H ₂).
Masa con carga añadida (kg).	1155.	1159.	1227.	1288
Capacidad del depósito (L)	45.	45.	36.	122,5 (5 kg).
Aceleración de 0-100km/h, (s).	9,9.	10,1.	10,4.	10,6.
Consumo.	5,2 L/100km.	4,8 L/100km.	4,3 L/100km.	1,16 Kg/100km (2 L/100km en el sistema equivalente al la gasolina, empleado por el simulador.
Emisiones de CO₂ (g/km).	112.	99.	88.	0.
Emisiones máximas de combustible sin reaccionar (HC), en g/km.	0,079.	0,039.	0,058.	0.
Emisiones	0,32.	0,11.	0,21.	0.

máximas de monóxido de carbono (CO), en g/km.				
Emisiones máximas de óxidos de nitrógeno (NOx) en g/km.	0,039.	0,043.	0,032.	0.
Emisiones máximas de partículas (PM) en ppm.	0,0034.	0,0046.	0,001.	0.
Velocidad máxima (km/h).	190.	182.	185.	160.

Como se ha podido comprobar en los apartados anteriores, un vehículo de celda de hidrógeno (H₂) que trabaje en este rango de potencia, puede proporcionar comportamientos similares a los de un automóvil propulsado por combustibles convencionales, con una serie de ventajas tanto a nivel de consumos, como de degradación ambiental. A su vez, como ya se ha analizado en el apartado del "estado del arte", aún estos vehículos poseen varios elementos a optimizar, gran parte de los cuales se encuentran aún a escala de laboratorio. Pasemos a continuación a enumerar las diferentes ventajas e inconvenientes que se lograrían mediante el empleo de esta clase de vehículos a grandes escalas.

a).-Emisiones de gases contaminantes durante la conducción: uno de los principales inconvenientes a escala global que generan el empleo de combustibles fósiles, es la emisión de gases contaminantes en grandes escalas. Actualmente, por ejemplo, de acuerdo a la "European Commission Environment", mediante la regulación N°443/2009, las emisiones promedias de dióxido de carbono (CO₂) de los vehículos es de 130g/km, mientras que se espera que se encuentren por debajo de 95g/km para 2020. Dicha legislación se implantó debido a la no reducción voluntaria por parte de los fabricantes.

Por el contrario, como se ha comprobado, mediante el empleo de esta nueva clase de automóviles que basan su funcionamiento en pilas de combustible, las emisiones de productos contaminantes se reducen a un valor nulo durante la conducción.

De esta manera, se reducirían las importantes cantidades de polución, generadas por parte de los automóviles convencionales a día de hoy, los cuales superan un 25% en la unión Europea. Dichas emisiones, son las responsables en gran porcentaje del aumento sobre el afecto invernal en nuestro planeta, con los impactos negativos que esto conlleva.

b).-Efectos de los gases contaminantes sobre el ser humano: De acuerdo a los datos anteriores de los gases contaminantes generados por los vehículos de combustión interna, se ha demostrado que ejercen un importante inconveniente sobre la salud. Estas sustancias, al ser introducidas a nuestro organismo, pueden generar numerosas enfermedades, fundamentalmente sobre el aparato respiratorio, e incluso alterar nuestro metabolismo debido a sus altas concentraciones, generando la muerte. Un claro ejemplo que soporta dicha teoría, tuvo lugar tras un informe realizado por Observatorio del Riesgo del Instituto de Estudios de la Seguridad (IDES) indica que el efecto más mortífero de la circulación es la contaminación de los coches, que causa cinco veces más muertes que los propios accidentes, llegando incluso a registrar 225000 fallecimientos por causas relacionadas con la polución.

Debido a dichas consecuencias, los vehículos de pila de hidrógeno toman otro importante punto a favor, al reducir considerablemente los gases contaminantes con importantes efectos negativos.

c).-Efectos de los gases contaminantes sobre la fauna y la flora: Otro de los efectos negativos a tener en cuenta que generan los vehículos de combustibles convencionales, es la contaminación sobre el reino animal y el vegetal.

De igual manera que dicho exceso de gases afecta al ser humano, también ejerce importantes consecuencias sobre las cadenas tróficas en el medio ambiente, ya que imposibilita el crecimiento de muchas especies endémicas, llegando incluso a generar su

extinción. A su vez, la contaminación sobre las diferentes especies afecta a las cadenas alimenticias, llegando a generar nuevamente efectos sobre la salud humana.

Por lo tanto, como se ha explicado en el apartado anterior, esta contaminación podría ser reducida mediante el empleo de vehículos de pila de hidrógeno (H₂) a gran escala.

d).-Consumos: Como se ha verificado anteriormente, los automóviles de pila de hidrógeno (H₂) generan un menor consumo de combustible en comparación a los convencionales, para condiciones de potencia similares, debido a que a partir de los poderes caloríficos se establece que 1kg de hidrógeno (H₂) equivale a 2,78kg de gasolina, 2,8kg de gasóleo y 3kg de gas natural. En cuanto a su autonomía se establecen valores similares frente a los de gasolina y gasóleo.

e).-Producción del hidrógeno (H₂): Como se ha estudiado anteriormente, a día de hoy el 95% de la producción del hidrógeno se da a partir de combustibles fósiles, pero sin embargo también se ha observado que en los últimos años están apareciendo diferentes adelantos en su producción, los cuales son bastante respetuosos con el medio ambiente. A pesar de que aún se encuentra a escala de laboratorio, han proporcionado resultados importantes y muy prometedores, los cuales se dirigen hacia la extracción de este elemento a partir del agua, debido a que es el principal portador de dicha sustancia. Una de las posibles soluciones a llevar a cabo a escala mundial para la generación de hidrógeno (H₂), sería la creación de una red a gran escala para su generación y transporte.

Debido a los numerosos métodos que se han estudiado para su producción, se observa que con su aplicación a gran escala se lograría suprimir la elevada dependencia de los países productores de los combustibles fósiles. Por esta razón, la elevada competencia generada por el mercado internacional a la hora de producir dicho combustible abarataría de forma importante su precio.

f).-Infraestructura: A la hora de generar un mercado globalizado a gran escala para la generación y el comercio del hidrógeno (H₂), se necesita como es lógico, de un importante capital a invertir, lo cual se encuentra directamente relacionado con el sistema político y con los intereses gubernamentales del momento.

A su vez, también se debería invertir en educación e investigación, ya que como se ha demostrado, el mecanismo de propulsión de este tipo de vehículos es totalmente diferente al empleado por los convencionales, por lo que para su mantenimiento y reparación, a día de hoy es bastante complicado encontrar personal cualificado dentro de esta rama.

Sin embargo, esto no se ha de ver como un punto en contra, ya que la investigación y la formación son dos pilares importantes dentro de la evolución tecnológica, y si se llevara a cabo la puesta en marcha de esta infraestructura, se generarían cantidades importantes de puestos laborales e incluso es un beneficio importante para ciertos países subdesarrollados. Esto último, se debe a las diferentes ramas de producción de hidrógeno (H₂), ya que al tratarse de uno de los elementos más abundantes en el universo, se podría obtener en diversas partes del planeta, a diferencia de lo que ocurre con los combustibles fósiles, por lo que incrementaría el desarrollo en gran cantidad de países a lo largo del mundo.

g).-Elementos a desarrollar: Además de las numerosas ventajas que nos ofrece este sistema, a día de hoy aún es una tecnología que en gran parte se encuentra en pleno desarrollo, por lo que gran parte de sus componentes necesitan de una optimización, para así alargar su tiempo de vida útil, incrementar su rendimiento y disminuir sus costes.

Fundamentalmente, el elemento clave de un vehículo de pila de hidrógeno (H₂) son sus celdas de combustible y dentro de éstas el componente que regula su funcionamiento es la membrana electrolítica (MEA). Actualmente, se emplean electrodos compuestos de una capa de platino (Pt) y carbono (C) sobre una lámina de Teflón (PTFE), junto con una membrana electrolítica de Nafion, al igual que en el modelo diseñado para el presente estudio. De esta forma, se logran densidades de corriente que rondan los 0,5A/cm². Sin embargo, como ya se ha explicado, se han encontrado alternativas las cuales optimizan de manera importante el comportamiento de la celda, bien mediante las membranas de quitosán, las de grafeno defectuoso u las de enzimas modificadas, entre otras.

A pesar de que se encuentran aún en escala de laboratorio, se puede obtener de manera complementaria a los cálculos anteriores, empleadas para el cálculo de la pila de combustible, las ventajas tras la optimización de las membranas electrolíticas.

• **Tabla 75:** Optimización de la pila de hidrógeno (H₂).

1.-Suponiendo la misma temperatura de operación, debido a que se tratan de celdas poliméricas, es decir 90°C y las mismas caídas de tensión (0,2V), se calcula mediante la energía libre estándar de la reacción un potencial de 0,97V por cada celda.
2.-A hora de componer la pila de combustible se empleaban tres ecuaciones.
• Ecuación 43: $I = A * j$ (I=Intensidad, A= superficie específica, j=Densidad de corriente).
• Ecuación 44: $V_{total} = n * V_i$ (V_{total}= Potencial de la pila, n=número de celdas, V_i=Tensión por celda).
• Ecuación 45: $P = I * V_{total}$ (P=Potencia de la pila de combustible).
3.-Si ahora se sustituyen las dos primeras ecuaciones sobre la tercera, se obtiene que la potencia total es equivalente a la siguiente expresión:
• Ecuación 46: $P = A * j * n * V_i$

Por lo tanto como se observa en la ecuación anterior y tomando en cuenta, como bien se explicó en el "estado del arte", que con los nuevos tipos de membranas electrolíticas se logra incrementa la densidad de corriente de la celda de hidrógeno (H₂), se puede verificar que para una misma potencia el número de celdas empleadas (n) y la superficie específica (A) se reducen, al ser inversamente proporcionales a la densidad de corriente (j).

De esta forma, se consigue disminuir el tamaño de la pila, reduciendo así su volumen. Otras de las propiedades importantes que ofrecen estas nuevas alternativas, es el incremento de su vida útil, un importante factor a tener en cuenta dentro de este sistema. A su vez, a igual

número de celdas y superficie específica, se incrementaría la potencia (P) proporcionada por la pila de hidrógeno (H₂).

En cuanto al almacenamiento de dicho combustible en los depósitos, como ya se ha visto, para hacer viable su empleo en automóviles se requieren elevadas presiones en los depósitos (70MPa), lo que requiere de un importante aporte energético. Sin embargo, si la potencia de la pila aumenta de la manera anterior, se puede emplear más energía en la compresión durante el repostaje de los depósitos, por lo que bien se puede incrementar la presión de almacenaje, para así disminuir el volumen del gas y elevar su capacidad.

Otro elemento importante a tener en cuenta en el sistema son las baterías empleadas, sobre las cuales se están centrando numerosas investigaciones, con el objetivo de optimizar los ciclos de carga y descarga e incrementar tanto su capacidad de almacenamiento energético como su tiempo de vida útil. Como ya se estudió, se están diseñando nuevos modelos de baterías de acuerdo a diferentes materiales, tales como las de grafeno o las de metal/aire, con las cuales se están logrando los objetivos esperados.

Finalmente, en cuanto a los motores empleados, los eléctricos, éstos proporcionan rendimientos cercanos al 95%, siendo de menor complejidad mecánica y de un mantenimiento más sencillo que los de combustión interna, por lo que son una importante alternativa como elemento propulsor del sistema motriz del vehículo.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

6.-CONCLUSIONES.

De acuerdo al estudio realizado, se puede observar que el hidrógeno (H₂) como posible vector energético dentro del mundo del automóvil, puede jugar un importante papel en las próximas décadas, llegando incluso a encabezarse como principal alternativa de los combustibles fósiles, mediante el empleo de celdas de combustible. A pesar de que aún se encuentra la gran parte a escala de laboratorio, por lo que se requiere de importantes infraestructuras a gran escala, se demuestra que existen numerosos mecanismos en pleno desarrollo que sustentan la viabilidad técnica del presente estudio.

Fundamentalmente, de acuerdo a las propiedades que ofrece el hidrógeno (H₂) desde el punto de vista de un combustible, la principal ventaja es la reducción hasta valores nulos de los productos contaminantes, tales como el dióxido de carbono (CO₂), el monóxido de carbono (CO), las emisiones de combustible sin reaccionar (HC), las emisiones de partículas (PM) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), debido a que dichas celdas de combustible poliméricas trabajan a temperaturas inferiores a los 100°C y únicamente generan como producto agua (H₂O). De esta manera, se logra dar solución a gran parte de los problemas que derivan de dichos gases contaminantes durante el rodaje del vehículo en carretera, los cuales influyen negativamente tanto a nivel ambiental, como sobre la salud de los seres vivos.

En cuanto al propio vehículo de pila de hidrógeno (H₂), queda demostrado tras los resultados, que se tratan de vehículos de dimensiones y comportamientos técnicos en carretera, similares a los que ha día de hoy trabajan con combustibles convencionales. A su vez, el sistema de pila de combustible ofrece mayores eficiencias respecto a los motores de combustión interna, ya que como se puede observar en la metodología, las pilas de hidrógeno (H₂) alcanzan rendimientos superiores al 60%, mientras que los motores eléctricos que emplean la energía eléctrica generada por la pila, superan valores de eficiencia del 90%. A ésta última conclusión, le ha de añadir las diversas ventajas que ofrecen los motores eléctricos en cuanto a contaminación acústica.

Sin embargo, debido a que se trata de una tecnología que prácticamente ha comenzado a desarrollarse en la última década, gran parte de ésta se encuentra aún a escala de laboratorio, con la cual se pretende dar solución a los diferentes inconvenientes con los que se topa dicho sistema. Básicamente, dentro de las celdas de combustible poliméricas (PEM), los estudios se basan en la búsqueda de nuevos materiales que sustituyan a los actualmente empleados en las membranas de intercambio protónico compuestas por Nafion y polvos manométricos de grafito, mezclados con un componente activo de platino (Pt) o rutenio (Ru) como electro-catalizador. Entre algunos de los prototipos más recientes en estos últimos años, destacan como ya se ha explicado en el "estado del arte", las membranas de quitosán, las membranas de grafeno defectuoso o las membranas P22-HYD.

Otro aspecto a tener en cuenta dentro de este tipo de mecanismo, consiste en el almacenamiento del hidrógeno (H₂), ya que en condiciones atmosféricas estándar posee una densidad equivalente a los 0,0893kg/m³. Por esta razón, a día de hoy se ha de almacenar en depósitos de alta presión que alcanzan los 70MPa, siendo necesaria una potencia del orden de un 12% de la generada por la pila de combustible a la hora de repostar dicho gas, tal y como se

demostró en los cálculos realizados. En cuanto a las investigaciones más recientes que tratan sobre su almacenamiento, éstas buscan almacenarlo a través de hidruros metálicos o en estado sólido, tal y como se ha analizado en el "estado del arte" de acuerdo a los artículos científicos citados.

En cuanto al sistema de baterías empleado en estos vehículos para almacenar parte de la energía eléctrica generada por la pila de hidrógeno (H₂), entran en juego los diversos prototipos de baterías que se encuentran siendo estudiadas, con la finalidad de resolver las limitaciones que ofrecen las baterías de Ión Litio (Li), las de Plomo (Pb) ácido y las de Metal Níquel (Ni) a día de hoy. Ente los estudios más recientes, como ya se ha explicado, destacan las de Litio (Li) aire, las de aluminio (Al) aire, las de sodio (Na) aire, las de Zinc (Zn) aire, las de sacarosa o las de grafeno, tal y como se ha explicado en el estudio.

Al igual, ocurre con los métodos de generación de hidrógeno (H₂), ya que existen diversas alternativas para su generación, pero gran parte de éstas se encuentran aún en pleno desarrollo. De acuerdo a la información recaudada en el presente estudio, la mayor parte del hidrógeno (H₂) generado a día de hoy, se obtiene a partir de combustibles fósiles, pero a su vez, se están desarrollando otros métodos menos degradantes frente al medio ambiente. Entre algunos de estos desarrollos, destacan el empleo de nuevos catalizadores compuestos de nano partículas (2-5nm) de NiFeOx inducidas a través de iones de Litio (Li) durante la electrólisis del agua (H₂O); la electrólisis de la urea; la electrólisis en fase de vapor; el uso de membranas electrolíticas P22-HYD para romper el enlace de la molécula de agua (H₂O); la fotosíntesis artificial; cultivos de organismos biológicos; a partir de residuos plásticos o a partir de fuentes de energía renovable, como pueden ser la biomasa o la eólica.

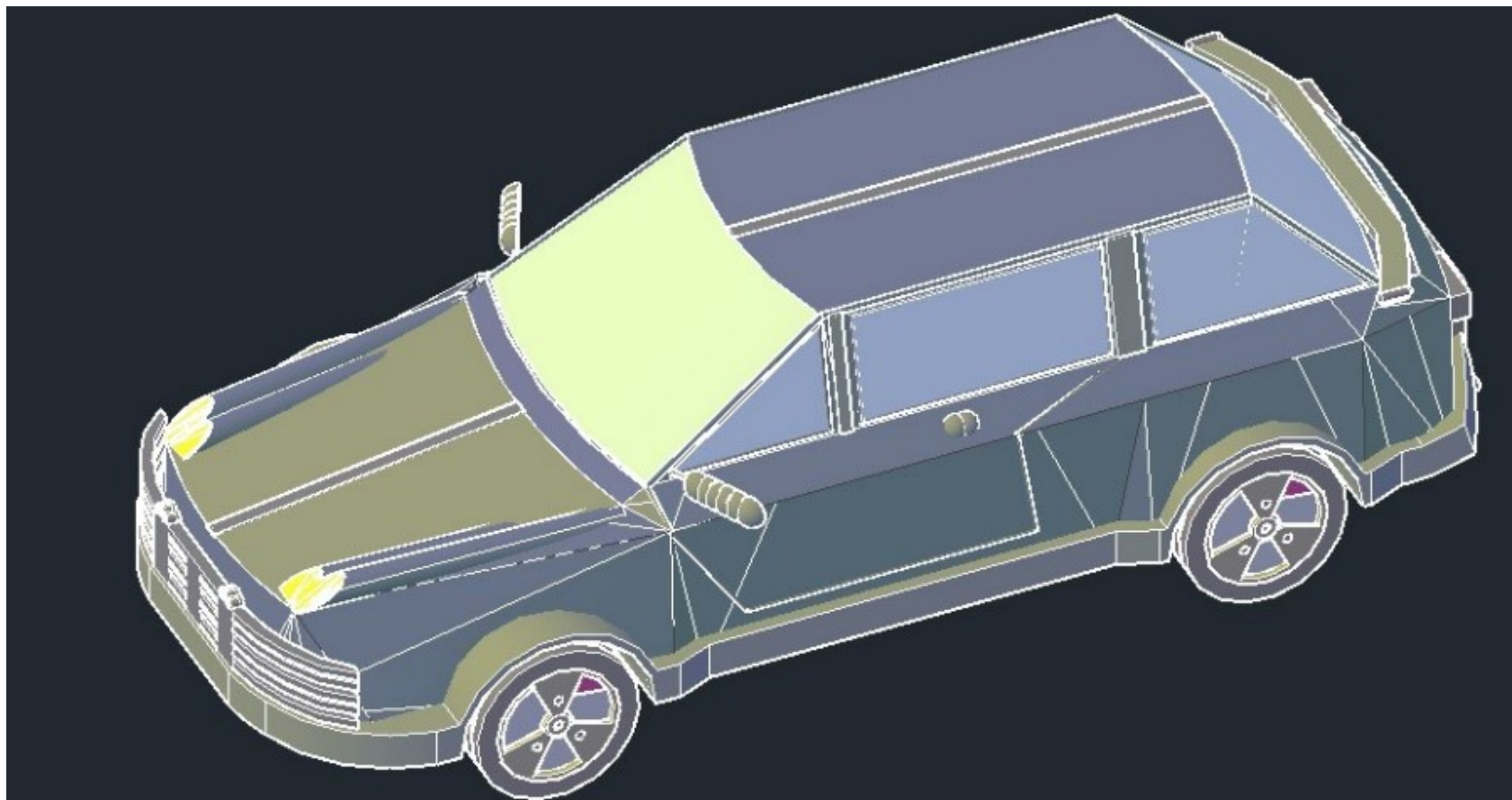
Finalmente, tras haber realizado el presente estudio, se puede concluir afirmando que el hidrógeno (H₂) como futuro vector energético en el automovilismo, es una importante vía a tener en cuenta a la hora de reemplazar a los combustibles fósiles convencionales desde un punto de vista técnico.

CAPÍTULO 7: ANEXOS

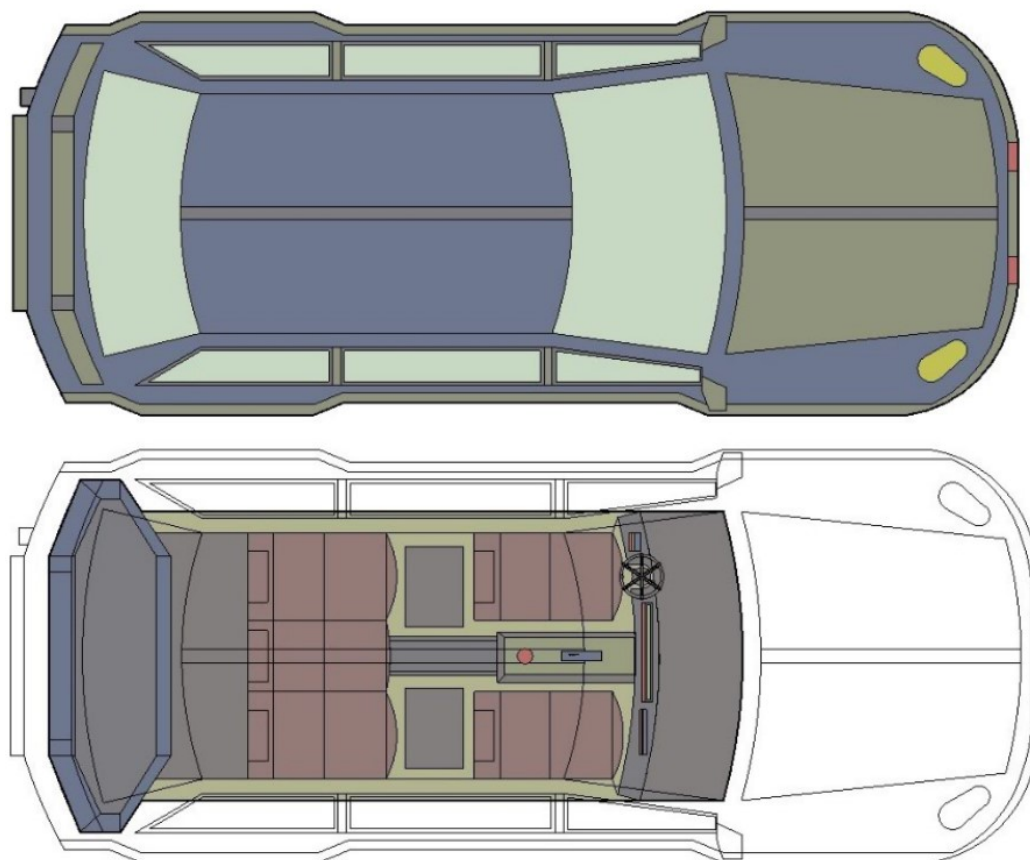
ÍNDICE:

7.-ANEXOS.	321
7.1.-Modelado en 3D del vehículo de pila de combustible.	321
7.2.- Modelado en planta del vehículo de celda de combustible.	322
7.3.-Modelado 3D del mecanismo de funcionamiento del vehículo de pila de combustible.	323
7.4.- Modelado en planta del mecanismo de funcionamiento del vehículo de pila de combustible.	324
7.5.-Modelado de la pila de hidrógeno (H₂) y de cada una de sus celdas (x250).	325
7.6.-Modelado 3D del sistema de almacenamiento energético de ión litio (Li) y de la CPU, del vehículo de pila de combustible.	326
7.7.-Modelado en 3D de la toma de oxidante (O₂).	327
7.8.-Modelado de los depósitos de hidrógeno (H₂) de alta presión en el vehículo de pila de combustible.	3278
7.9.-Modelado del motor eléctrico de corriente alterna del vehículo de pila de combustible.	329
7.10.-Modelado de los dispositivos de inyección y conducción del hidrógeno (H₂) en el vehículo de pila de combustible.	330
7.11.-Modelado de las ruedas con freno regenerativo del vehículo de celda de combustible.	331
7.12.-Esquema del funcionamiento del vehículo de pila de combustible modelado.	332

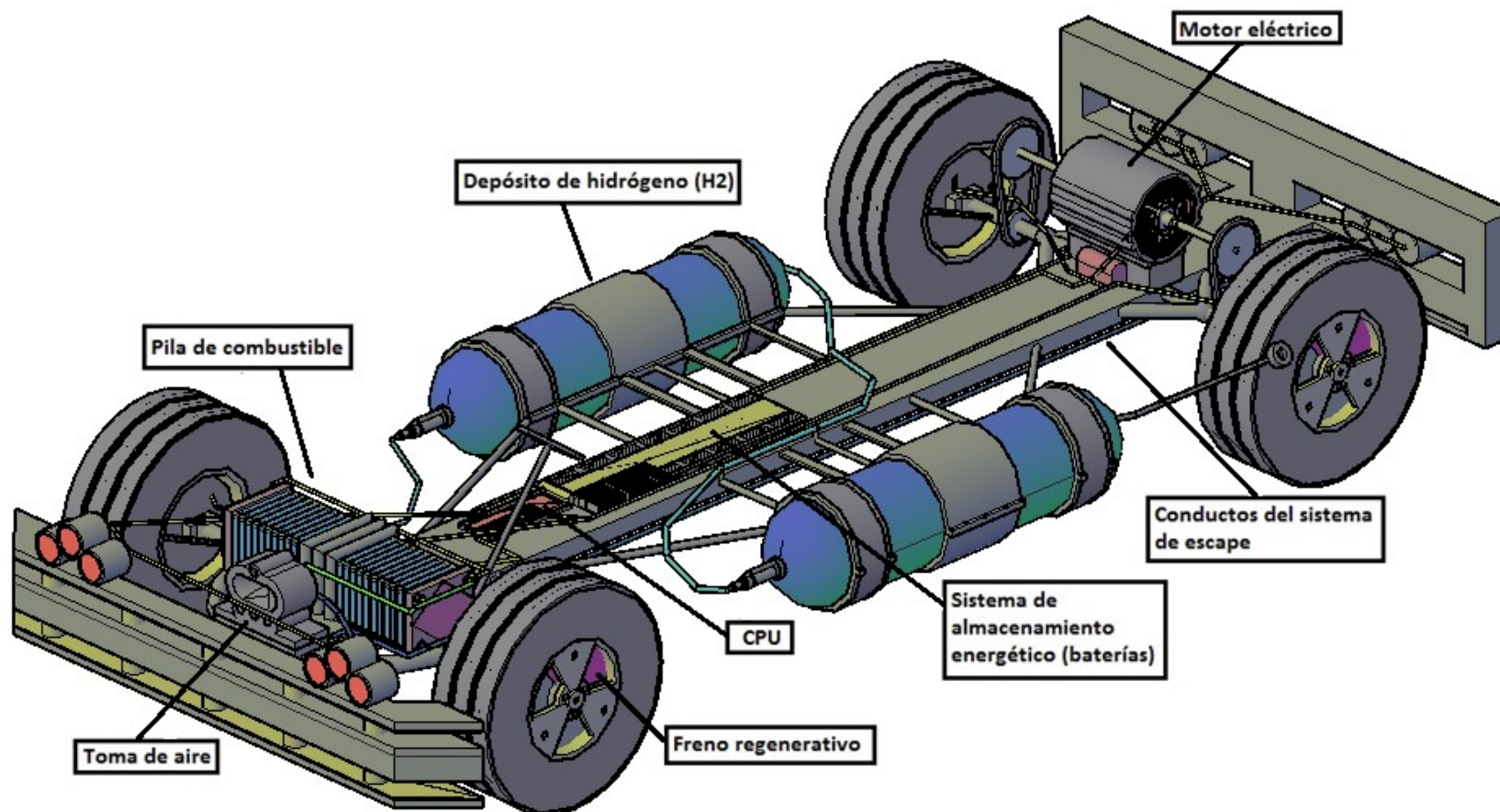
7.1.-Modelado en 3D del vehículo de pila de combustible.



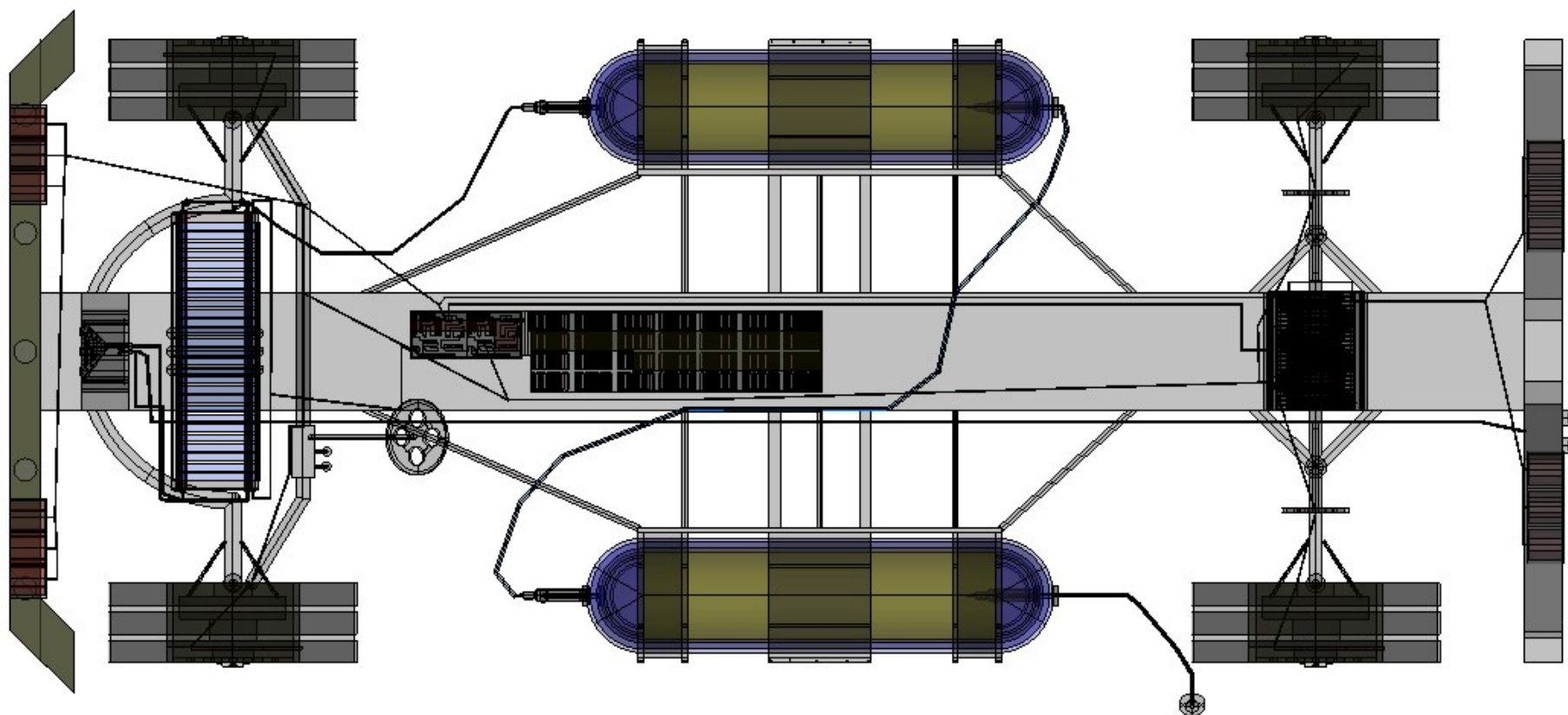
7.2.- Modelado en planta del vehículo de celda de combustible.



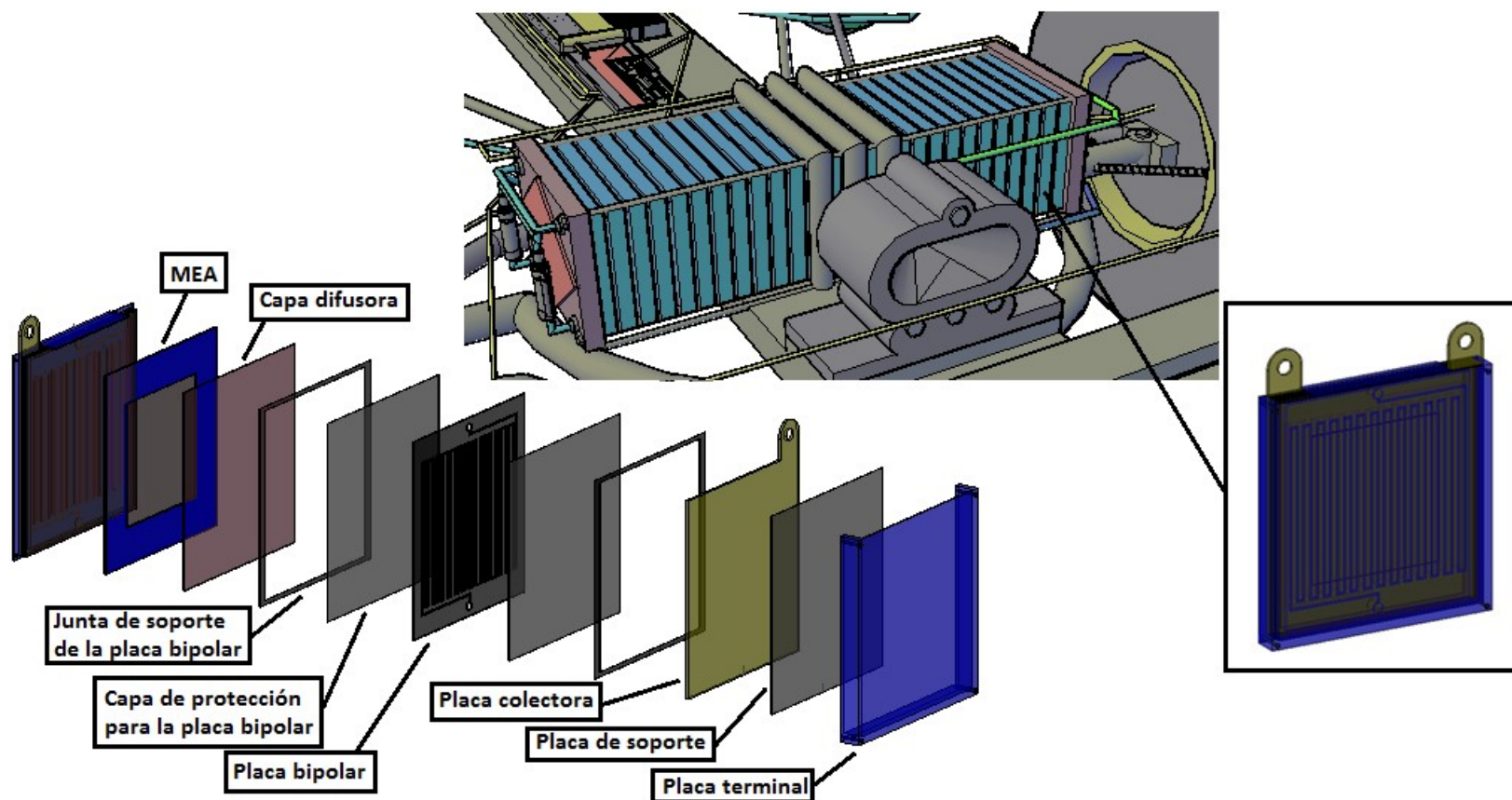
7.3.-Modelado 3D del mecanismo de funcionamiento del vehículo de pila de combustible.



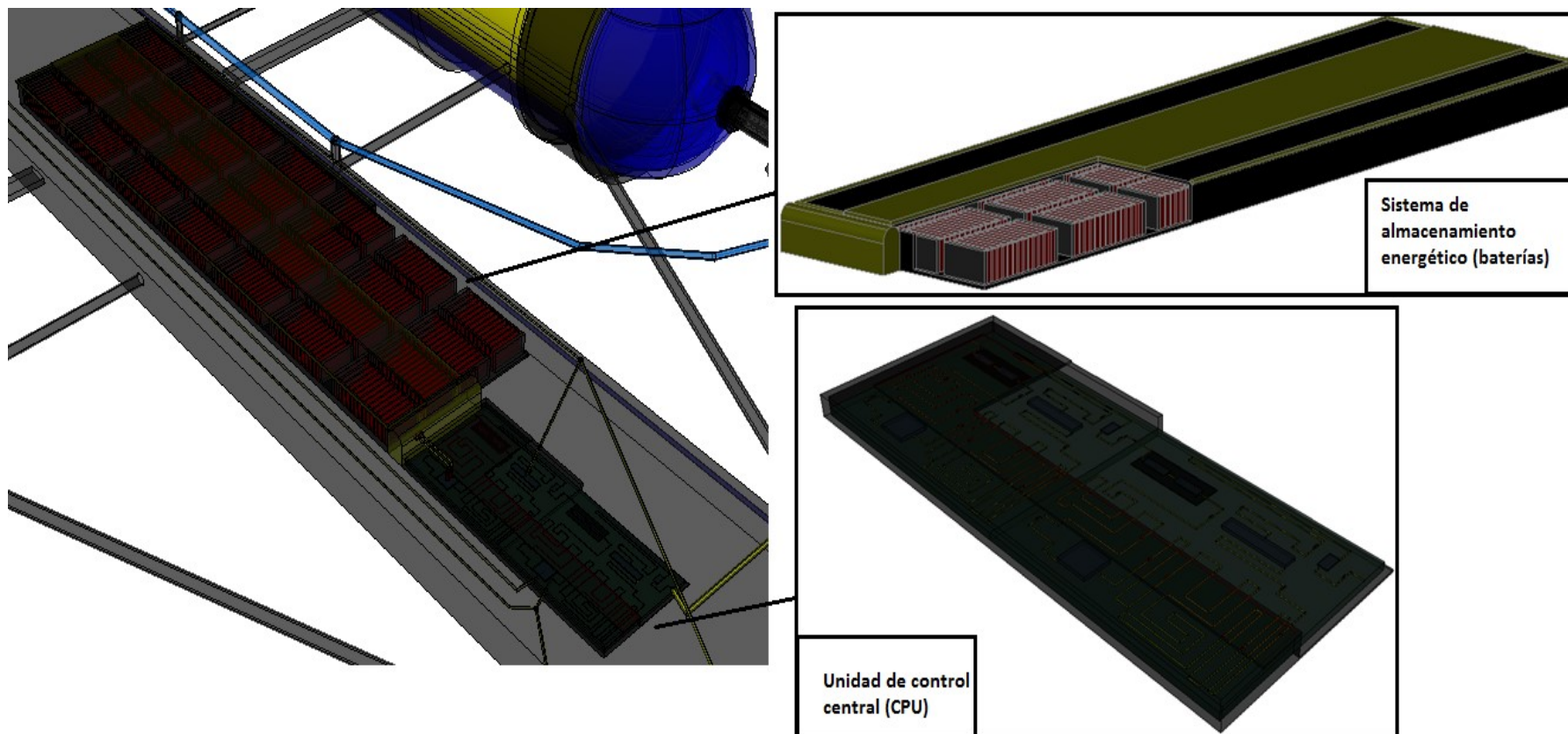
7.4.- Modelado en planta del mecanismo de funcionamiento del vehículo de pila de combustible.



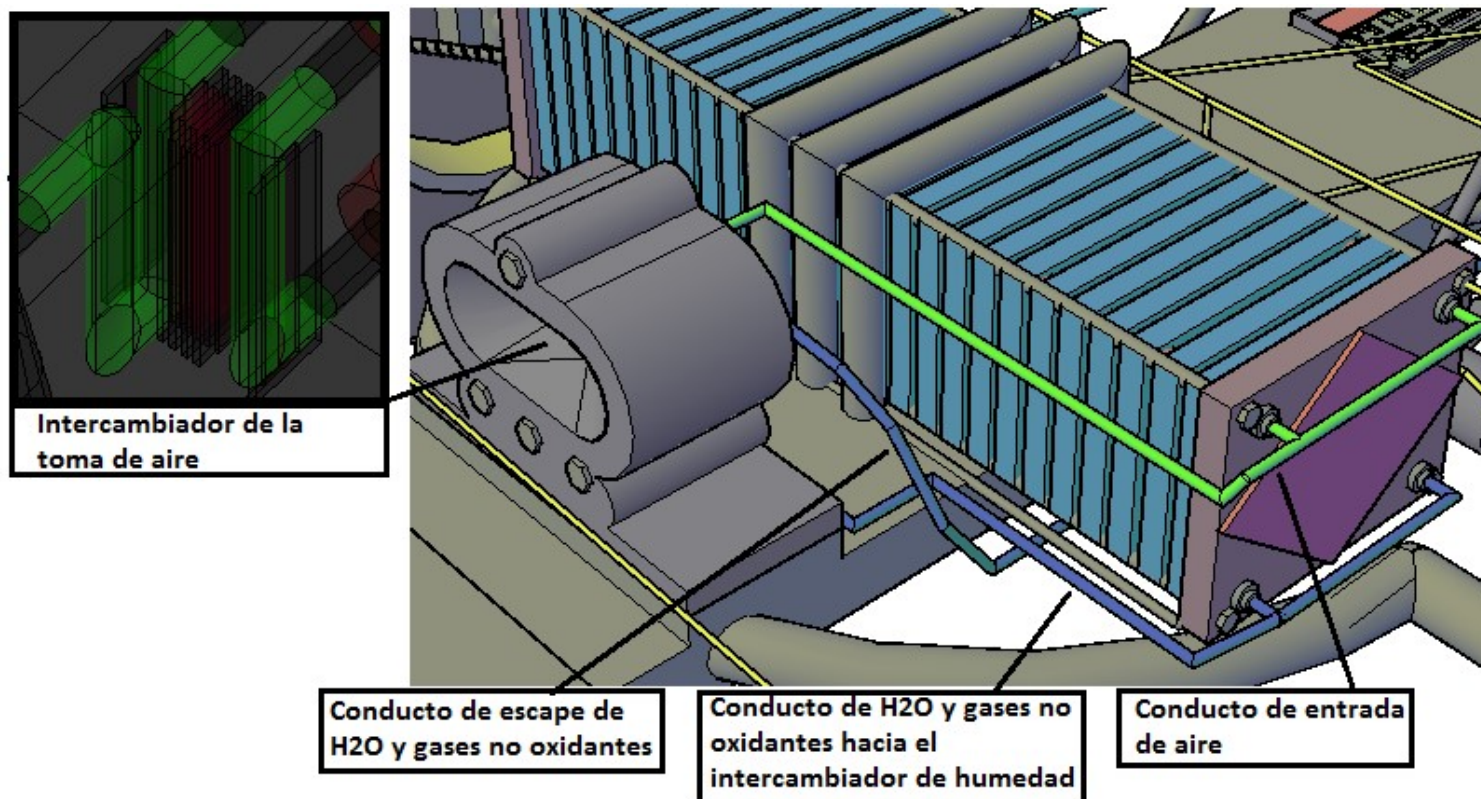
7.5.-Modelado de la pila de hidrógeno (H_2) y de cada una de sus celdas (x250).



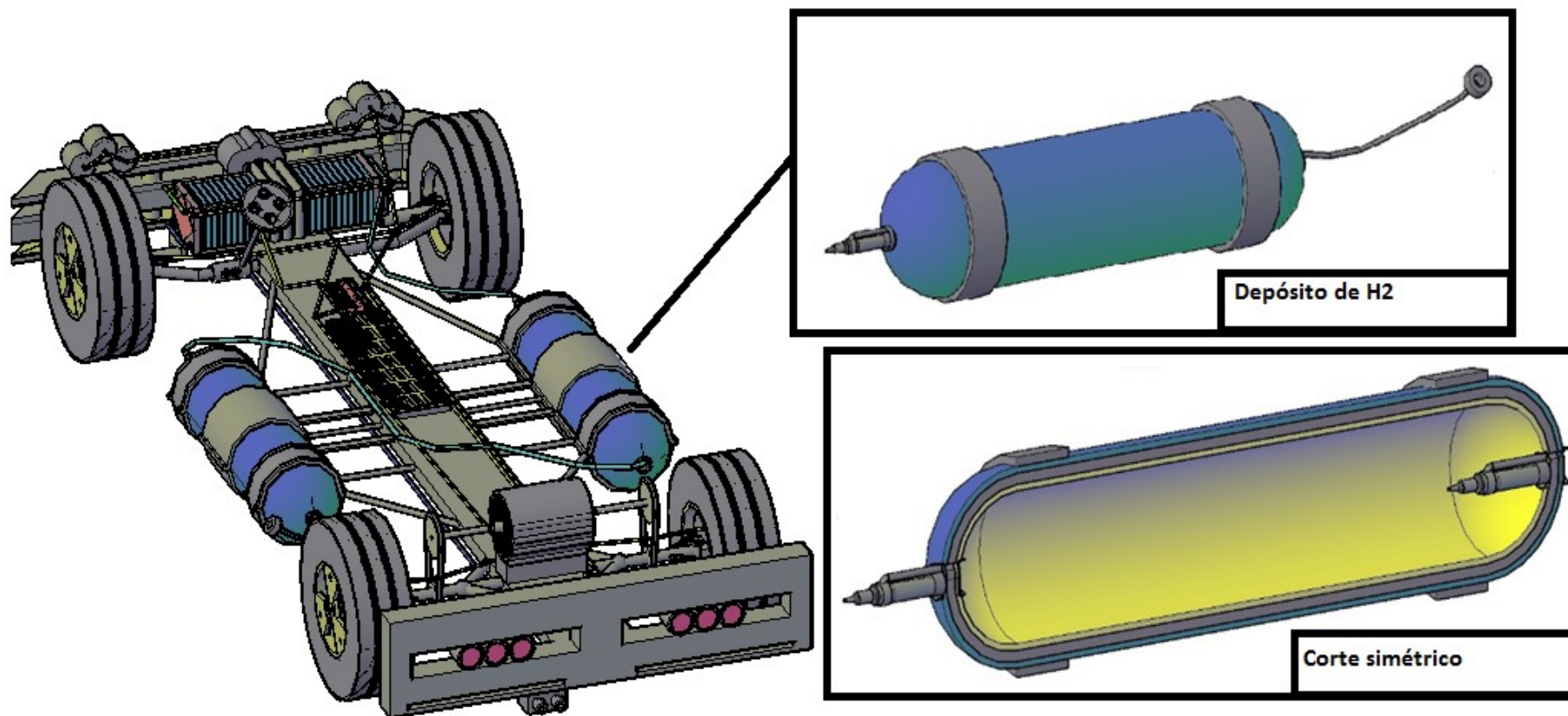
7.6.-Modelado 3D del sistema de almacenamiento energético de ión litio (Li) y de la CPU, del vehículo de pila de combustible.



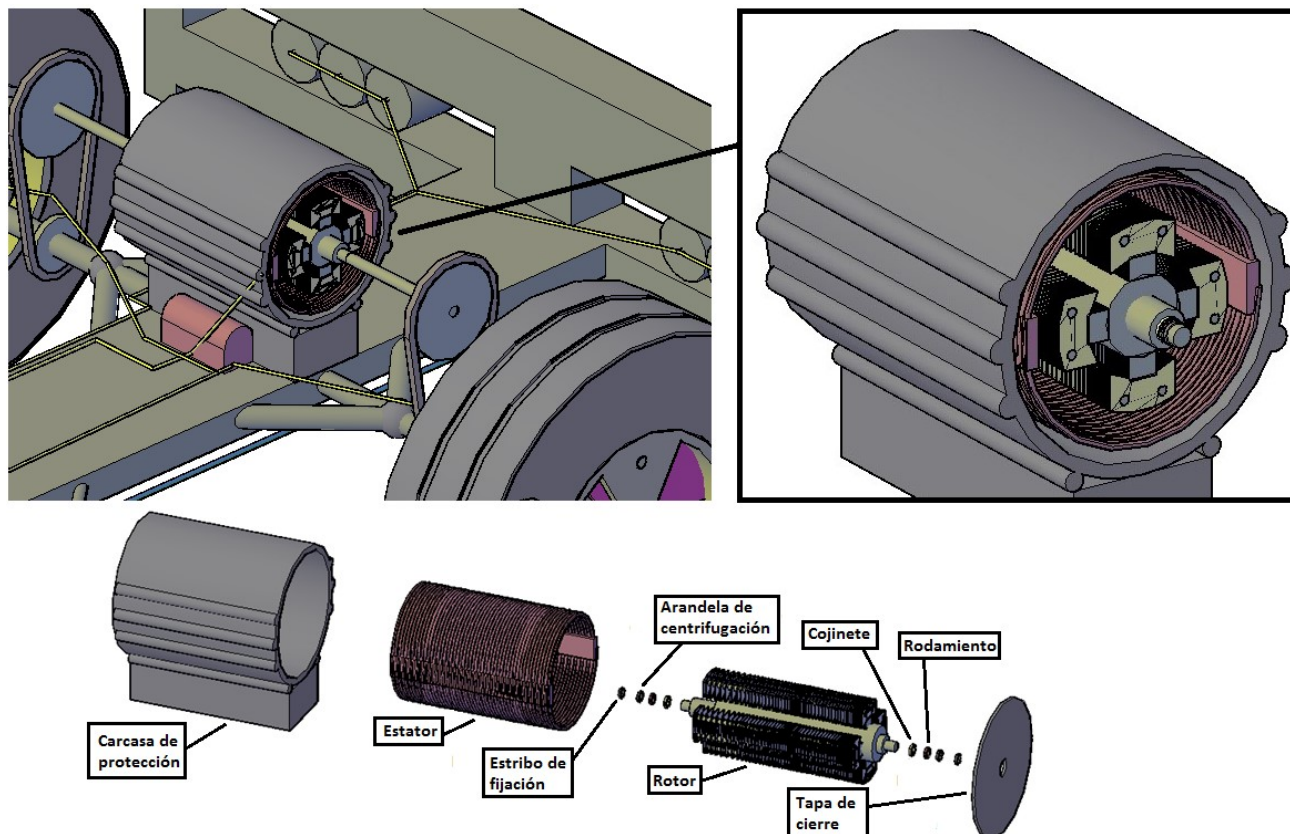
7.7.-Modelado en 3D de la toma de oxidante (O_2).



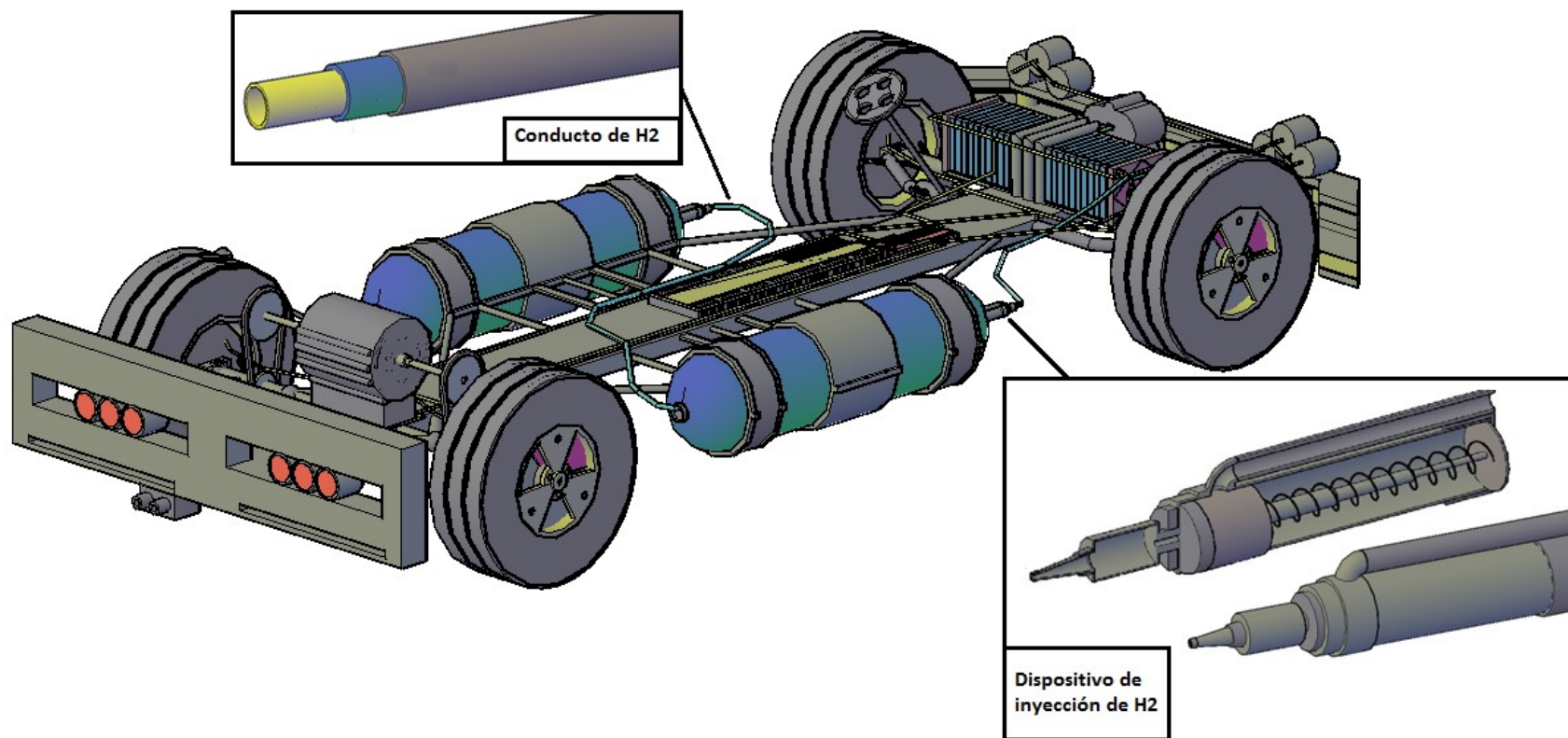
7.8.-Modelado de los depósitos de hidrógeno (H_2) de alta presión en el vehículo de pila de combustible.



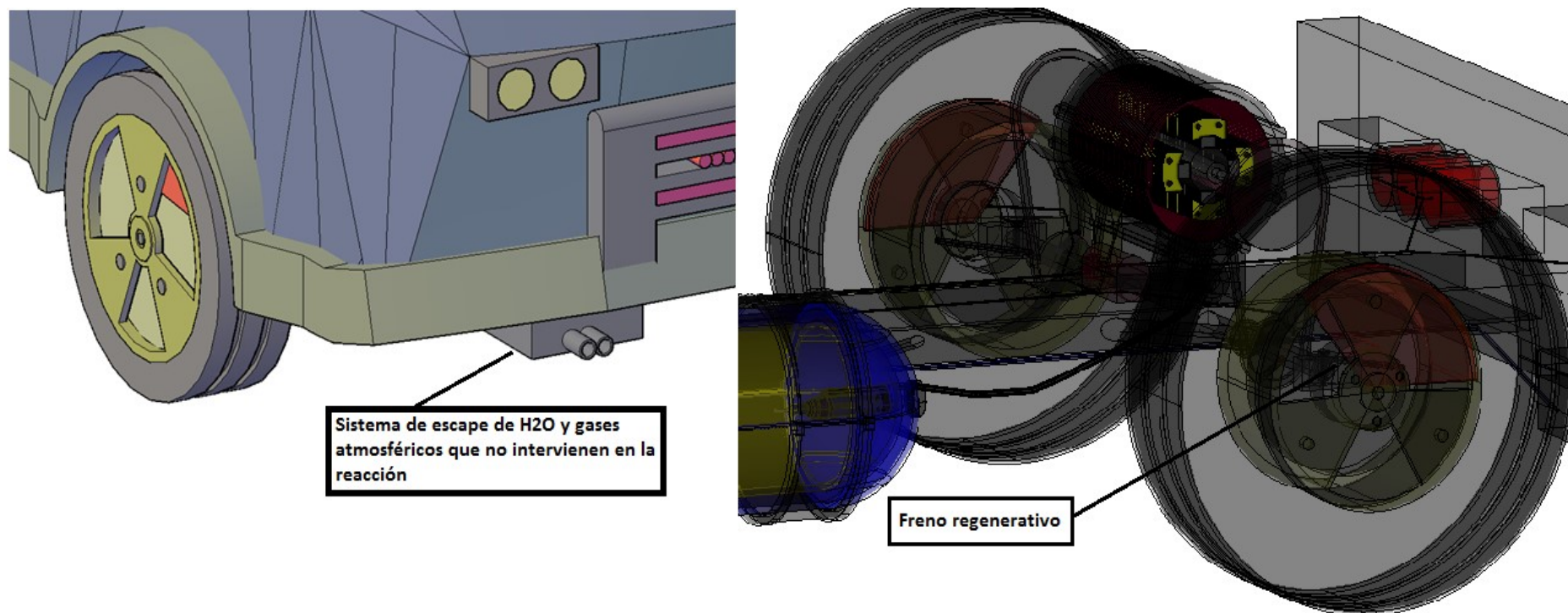
7.9.-Modelado del motor eléctrico de corriente alterna del vehículo de pila de combustible.



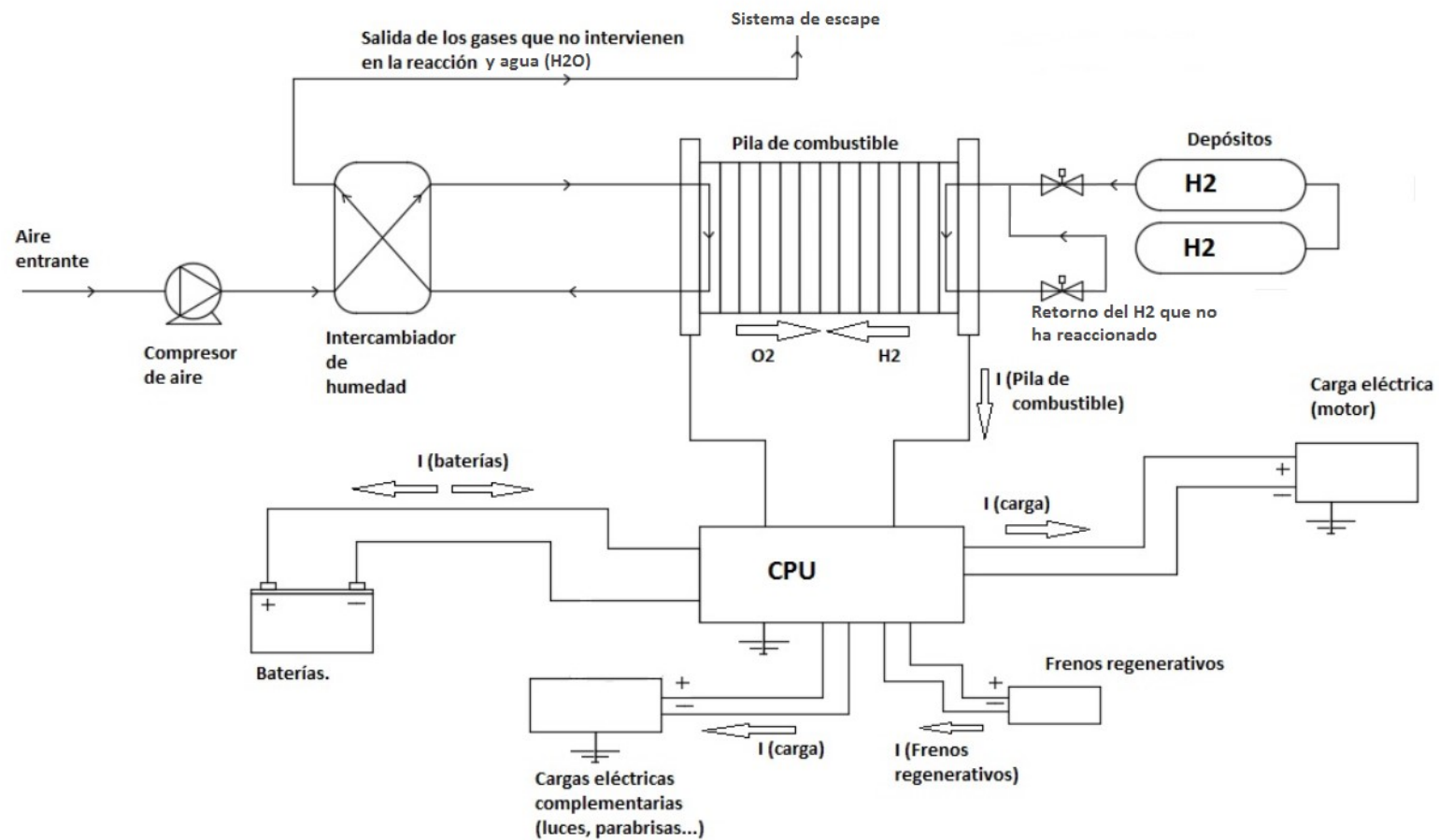
7.10.-Modelado de los dispositivos de inyección y conducción del hidrógeno (H_2) en el vehículo de pila de combustible.



7.11.-Modelado de las ruedas con freno regenerativo del vehículo de celda de combustible.



7.12.-Esquema del funcionamiento del vehículo de pila de combustible modelado.



CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA, **ARTÍCULOS CIENTÍFICOS Y** **TRABAJO CITADOS**

ÍNDICE:

8.-BIBLIOGRAFÍA, ARTÍCULOS CIENTÍFICOS Y TRABAJOS CITADOS:	336
8.1.-Fuentes bibliográficas.	336
8.2.-Fuentes de trabajos científicos.	336
8.3.-Fuentes de artículos procedentes de revistas científicas.	337
8.4.-software.	338

7.-BIBLIOGRAFÍA, ARTÍCULOS CIENTÍFICOS Y TRABAJOS CITADOS.

A continuación, se exponen las diferentes fuentes de carácter científico, sobre las que se ha apoyado el presente estudio para así lograr su objetivo. Dicha información ha sido obtenida a través de diferentes bibliografías, artículos científicos publicados en revistas de su respectivo ámbito y en trabajos de carácter técnico elaborados por diferentes universidades y otros organismos científicos. Algunos de ellos ya han sido mencionados dentro de su respectivo análisis, en el apartado de "estado del arte" del presente trabajo. Cada fuente mostrada a continuación y dividida en cada uno de los tres apartados anteriores, se enlaza con su respectivo apartado dentro del estudio, mediante su correspondiente número de citación.

7.1.-Fuentes bibliográficas.

- (2). Jhon Ramiro Aguelo. Tomo 1: Motores térmicos. Facultad Universidad de Antioquia.
- (4). Mazda. Opening a New Frontier with the Rotary Engine (Chapter I).
- (5). Mazda. Entering a New Era and Looking Further into the Future (Chapter III).
- (6). Luis José García Ruiz. Tetraetilo de Plomo (Pb). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (Madrid).
- (10). Toyota. Data Sheet of Toyota Mirai, a new fuel cell vehicle (2015).
- (11). Audi. Data sheet of Audi h-tron quattro concept (2016).
- (12). NanoFlowcell. Data Sheet of Quant E-Sport Limousine (2014).
- (13). NanoFlowcell. Data Sheet of Quant-FE (2015).
- (14). NanoFlowCell. Data Sheet of Quantino (2016).
- (16). Parreño Ibáñez Santos. Mantenimiento de sistemas auxiliares del motor de ciclo diésel. IC Editorial (2014).
- (17). Kazimierz Lejda and Pawel Wos. Internal Combustion Engines. InTech (2012).
- (18). Richard Van Basshuysen and Fred Schafer. Internal Combustion Engine Reference Book: Basics, Components, Systems and Perspectives. Society of Automotive Engineers (2004).
- (19). Ángel Moreno. Motores de combustión Interna. Mailxmail.
- (20). Mazda. Manual del Motor Wankel, estructura y principios de funcionamiento. E-Auto.
- (21). Santiago Sanz Aceves. Motor Wankel o Rotativo. EDITEX (2011).
- (22). Santiago Sanz Aceves. Vehículos Híbridos y Eléctricos. EDITEX (2011).
- (23). Humberto Cruz Ortiz. Elaboración de Gasolinas. Gerencia de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Pemex Refinación).

- (24). Miguel Ángel Leiva, Nicolás Rodríguez Martínez y Nuncio. El gasóleo Diesel. Gerencia de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Pemex Refinación).
- (25). Eloy Alvarez Pelgry y Jacobo Balbas Pelaez. El gas natural, del yacimiento al consumidor, aprovisionamientos y cadena del gas natural licuado (GLP). S.L. CIE INVERSIONES EDITORIALES DOSSAT-2000 (2003).
- (26). Asociación Española de Operadores de Gases Licuados del petróleo (GLP). ¿Qué es el GLP? AOGLP.
- (32). Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. El hidrógeno (H₂) y la pila de combustible. Energías renovables para todos.
- (35). Massachusetts Institute of Technology (MIT). How does a battery work? Ask an engineer (2012).
- (36). Energy power Systems. Lead (Pb) energy sorage system.
- (43). NanoFlowcell. Introducing the nanoFLOWCELL. NanoFLOWCELL AG.
- (44). Jose Luis G.Fierro. El hidrógeno (H₂), metodologías de producción. Instituto de Catálisis y Petroquímica (CSIC).
- (45). Jose Luis G.Fierro *et al.* El hidrógeno (H₂), un vector energético no contaminante para automoción. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC).
- (52). Solar AMT. Generación de hidrógeno mediante energía eólica. The Energy Innovations Company (2013).

7.2.-Fuentes de trabajos científicos.

- (3). Victor Raúl Agüero Zamora. Diseño y Construcción de un motor Stirling para la generación de energía eléctrica. Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima (2006).
- (7). Daniel Gómez Franco. El hidrógeno (H₂) y sus aplicaciones energéticas. Instituto La Ferrería (Montcada I Reixac), 2010.
- (8). Miguel Gutiérrez García. Estudio de factibilidad de una celda de combustible en la aplicación de autobuses urbanos. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Unidad de Culhuacan (2015).
- (9). Félix Barreras y Antonio Lozano. El hidrógeno (H₂) y su aplicación en las pilas de combustible de tipo poliméricas (PEM). Año Internacional de la Energía Sostenible (Universidad de Zaragoza), 2012.
- (15). Ismael Rivera Olín. Análisis exergético a un motor de combustión interna Otto. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (2002).

- (28). Jose Javier Martínez Sánchez. Análisis de sensibilidad de los parámetros de diseño de la placa bipolar de una pila de combustible tipo PEM. E-REdING (Trabajos y proyectos fin de estudios de la E.T.S.I), 2015.
- (29). Juan Antonio Asensio, Juan Peña *et al.* Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. Centro de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología (CSIC-ICN), 2011.
- (33) Hernán Américo Peretti y Arnaldo Visitin. Hidrógeno (H₂), el combustible del futuro. Centro Atómico Bariloche (Comisión Nacional de Energía Atómica), Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas Aplicadas (INIFTA), 2015.
- (34) María José Cocero, Luis Miguel Sanz Moral *et al.* Proyecto HIDROWAVE. Universidad de Valladolid (UVa), 2015.
- (39). José Gonzalez Carmona, M^a Ángeles Hernández Vozmediano y Francisco Guinea. El grafeno, una lámina de carbono cuyo espesor puede ser de un sólo átomo, muestra propiedades electrónicas exóticas que revisten un gran interés para la investigación fundamental y el desarrollo de nuevos materiales. DIGITAL.CSIC (Spanish National Research Council), 2010.
- (40). Robert Mikhail Guzmán Arellano. Transporte de carga y espín en grafeno. Universidad Nacional de Cuyo (2010).
- (41). Marc Fábrega Ramos. Hidrógeno (H₂), aplicación en motores de combustión interna. Facultad de Náutica de Barcelona (UPC), 2009.
- (42). Rosalio Cusi Palomino. Composición del aire. Escuela Academico Profesional de Ingeniería Química (Universidad Nacional de Perú), 2010.
- (51). Itsaso Barbarias. Hidrógeno (H₂) a partir de residuos plásticos. Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 2016.

7.3.-Fuentes de artículos procedentes de revistas científicas.

- (1). Jorge Enrique Gaviria Ríos, Jorge Hernán Mora Guzmán y Jhon Ramiro Agudelo. Historia de los motores de combustión interna. Revista Facultad de Ingeniería (2002).
- (27). Vilmar Graciano, Jose Viriato C.Vargas and Juan C.Ordonez. Modeling and simulation of diesel, biodiesel and biogas mixtures driven compression ignition internal combustion engines. International Journal of Energy Research (2016).
- (30). Claudia Alicia Cortés Escobedo (Centro de Investigación e Innovación Tecnológica del IPN). Synthesis and Characterization of Quitosán Membranes for Application in PEMFC. Procedia Engineering Journal, 2012.
- (31). Franz M.Geiguer *et al.* (Northwestern University). Aqueous Proton Transfer Across Single Layer Graphene. Nature Communications, 2015.
- (37). Dr. Ryohei Mori at Fuji Pigment. Addition of Ceramic Barriers to Aluminum (Al)-Air Batteries. Journal of The Electrochemical Society (2015).

- (38). Yanguang Li, Ming Gong, Yongye Liang *et al.* Advanced zinc (Zn)-air batteries based on high performance hybrid electrocatalysts. Nature Communication (2013).
- (46). Haotian Wang, Hyun-Wook Lee, Yong Deng, Zhiyi Lu, po-Chun, Yayuan Liu, Dingchang Lin & Yi Cui. Bifunctional non-noble metal oxide nanoparticle electrocatalysts through lithium-induced conversion for overall water splitting. Nature Communications, 2015.
- (47). Paul C.Jordan, Dustin P.Petterson, Kendall N.Saboda *et al.* Self-assembling biomolecular catalysts for hydrogen (H₂) production. Nature Chemistry (2015).
- (48). Bryan K. Boggs, Rebecca L. King and Gerardine G. Botte. Urea electrolysis: Direct hydrogen production from urine. Chemical Communications, 2009.
- (49). Kevin P.Lucht and Jose L.Mendoza Cortés. Birnessite: A Layered Manganese Oxide to Capture Sunlight for Water-Splitting Catalysis. The Journal of Physical Chemistry, 2015.
- (50). Shannon A.Bonke, Mathias Wiechen, Douglas R.MacFarlane & Leone Spiccia. Renewable fuels from concentrated solar power: Towards practical artificial photosynthesis. Energy and Environmental Science, 2015.

7.4.-Software.

- a) Auto Cad 3D, 2016 version. Autodesk (Design and engineering software).
- b) Matlab, 2016 version. Mathworks (The language of technical computing).
- c) Advisor, 2013 versión. Advanced Vehicle Simulator.
- d) Microsoft Office 2010.

