

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis de sistemas de propulsión para automoción
basados en pilas de combustible y estimación de
costes

Autor: Fernando Rafael Rodríguez Quesada

Tutor: José Alfredo Iranzo Paricio

Cotutora: María del Carmen Pavón Moreno

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis de sistemas de propulsión para automoción basados en pilas de combustible y estimación de costes

Autor:

Fernando Rafael Rodríguez Quesada

Tutor:

José Alfredo Iranzo Paricio

Cotutora:

María del Carmen Pavón Moreno

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: Análisis de sistemas de propulsión para automoción basados en pilas de combustible y estimación de costes

Autor: Fernando Rafael Rodríguez Quesada

Tutor: José Alfredo Iranzo Paricio

Cotutora: María del Carmen Pavón Moreno

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin la inestimable ayuda de mi tutor José Alfredo Iranzo Paricio y mi cotutora María del Carmen Pavón Moreno, que gracias a su dirección y comentarios se han logrado los objetivos propuestos en este trabajo.

Agradecer a mis padres, que gracias a su sacrificio, esfuerzo y apoyo incondicional me han brindado la oportunidad de realizar mis estudios en esta escuela.

Fernando Rafael Rodríguez Quesada
Alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Sevilla, 2021

Debido al inevitable agotamiento de los combustibles fósiles y de su impacto negativo en el medio ambiente, se presenta el hidrógeno como un vector energético eficiente y versátil capaz de almacenar energía procedente de fuentes de energía renovable, lo que lo convierte en un combustible completamente limpio y compatible con el medio ambiente. Se muestra la evolución que han tenido las aplicaciones relacionadas con este elemento químico a lo largo de la historia y como actualmente, numerosos países de todo el mundo apuestan por la investigación y desarrollo de las pilas de combustible de hidrógeno.

En este trabajo se busca realizar un análisis detallado de los sistemas de propulsión para la automoción basados en pilas de combustible. Para ello, se estudia el uso de todos los componentes pertenecientes al sistema de propulsión. Entre ellos, destaca la importancia de la pila de combustible, cuyo funcionamiento es explicado con más detalle.

Una vez analizado el uso de las pilas de combustible en el sector de la automoción, se evalúan sus costes actualmente, de fabricación, de infraestructura y del combustible, con el objetivo de mostrar alternativas viables a día de hoy y, gracias a su amplio margen de mejora, su positiva proyección e implementación en determinados tipos de sectores del transporte. A su vez, se expone una comparación entre otra alternativa de vehículo sin emisiones como son los automóviles eléctricos.

Finalmente, empleando curvas de polarización experimentales obtenidas de trabajos previos, se realiza un estudio de cómo afectan las condiciones de operación a los costes del stack y del sistema de la pila de combustible, calculando el número de celdas de combustible necesario para cada condición de operación y concluyendo cuáles son los parámetros que optimizan este coste.

Sevilla, 2021

Abstract

Due to the inevitable depletion of fossil fuels and their negative impact on the environment, hydrogen is presented as an efficient and versatile energy vector capable of storing energy from renewable energy sources, which makes it a completely clean and environmentally compatible fuel. It shows the evolution of the applications related to this chemical element throughout history and how many countries around the world are currently committed to the research and development of hydrogen fuel cells.

The aim of this work is to carry out a detailed analysis of automotive propulsion systems based on fuel cells. For this purpose, the use of all the components belonging to the propulsion system is studied. Among them, the importance of the fuel cell stands out, whose operation is explained in more detail.

Once the use of fuel cells in the automotive sector has been analyzed, their current manufacturing, infrastructure and fuel costs are evaluated, with the aim of showing viable alternatives at present and, thanks to their wide margin for improvement, their positive projection and implementation in certain types of transport sectors. At the same time, a comparison is made between other emission-free vehicle alternatives such as electric cars.

Finally, using experimental polarization curves obtained from previous works, a study of how operating and design conditions affect stack and fuel cell system costs is carried out, calculating the number of fuel cells required for each operating condition and concluding which are the parameters that optimize this cost.

Seville, 2021

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xv
Índice de Ilustraciones	xvi
Notación	xviii
1 Introducción	11
1.1 <i>El hidrógeno como combustible.</i>	11
1.1.1 Contexto histórico.	11
1.1.2 Características del hidrógeno.	14
1.2 <i>Panorama energético.</i>	15
1.2.1 Demanda energética global.	15
1.2.2 Emisiones de CO ₂ .	15
1.2.3 Acuerdo de París.	17
1.2.4 Situación nacional.	17
1.2.5 Situación europea.	19
1.2.6 Energías renovables.	20
1.2.7 Políticas internacionales.	21
2 Sistemas de propulsión de vehículos con pilas de combustible	24
2.1 <i>Sistemas de propulsión.</i>	24
2.2 <i>Pilas de combustible.</i>	28
2.2.1 Introducción a las pilas de combustible.	28
2.2.2 ¿Cómo funcionan las pilas de combustible?	30
2.2.3 Tipos de pilas de combustible.	32
3 Análisis económico	35
3.1 <i>Costes de los sistemas de pilas de combustible PEM para automóviles.</i>	37
3.1.1 Avances tecnológicos.	43
3.1.2 Estimación del coste total del sistema.	46
3.2 <i>Análisis del coste total del ciclo de vida de un FCEV.</i>	49
3.2.1 Análisis del informe de Strategic Analysis (2018).	49
3.2.2 Comparativa entre los vehículos de pila de combustible y los vehículos eléctricos.	52
3.2.3 Análisis del coste total de propiedad de un autobús según el tipo de sistema de propulsión.	53
3.3 <i>Variación del coste de las pilas de combustible tipo PEM según sus condiciones de operación.</i>	55
3.3.1 Pruebas de temperatura.	57
3.3.2 Pruebas de presión.	60
3.3.3 Pruebas de estequiometría del cátodo.	62
3.4 <i>Estudio de sensibilidad de una única variable.</i>	65
4 Conclusiones	67
5 Referencias	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen general políticas de los principales mercados [27].	22
Tabla 2: Comparativa número de FCEVs en 2019 y en el futuro [33].	30
Tabla 3: Comparativa tipos de pilas de combustible [41].	32
Tabla 4: Comparación aplicaciones, ventajas y debilidades por tipos de pilas de combustible [41].	33
Tabla 5: Características del sistema (2018) [45].	39
Tabla 6: Materiales del sistema y especificaciones del proceso (2018)[45].	39
Tabla 7: Estudio de sensibilidad para valores de los parámetros de un automóvil (2018)[50].	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1: Primera furgoneta propulsada por una pila de combustible de hidrógeno con un electrolito alcalino [7].</i>	12
<i>Ilustración 2: Componentes Toyota Mirai [8].</i>	13
<i>Ilustración 3: Comparativa stacks Toyota Mirai [8].</i>	13
<i>Ilustración 4: Esquema que muestra la variedad de aplicaciones del hidrógeno [13].</i>	14
<i>Ilustración 5: Demanda de energía primaria global según cada escenario [15].</i>	15
<i>Ilustración 6: Emisiones de CO2 procedentes del uso de energía global [16].</i>	16
<i>Ilustración 7: Cambios en las emisiones de CO2 por combustible asociado [16].</i>	16
<i>Ilustración 8: Suministro total de energía anual según procedencia [22].</i>	18
<i>Ilustración 9: Escenario posible de implementación del hidrógeno en los diferentes sectores industriales [24].</i>	20
<i>Ilustración 10: Beneficios del hidrógeno para la Unión Europea [24].</i>	20
<i>Ilustración 11: Diagrama de flujo Toyota Mirai [8].</i>	24
<i>Ilustración 12: Imagen real (frontal) componentes Toyota Mirai [8].</i>	25
<i>Ilustración 13: Imagen real componentes FCEV Toyota Mirai [30].</i>	25
<i>Ilustración 14: Especificaciones técnicas Hyundai Nexo [34].</i>	26
<i>Ilustración 15: Distribución componentes Hyundai Nexo [35].</i>	27
<i>Ilustración 16: Funcionamiento frenada regenerativa Hyundai Nexo [34].</i>	27
<i>Ilustración 17: Funcionamiento batería + pila de combustible Hyundai Nexo [34].</i>	28
<i>Ilustración 18: Funcionamiento de la pila de combustible [27].</i>	31
<i>Ilustración 19: PEM fuel cell stack [37].</i>	31
<i>Ilustración 20: Crecimiento flota de vehículos hasta 2030 [26].</i>	35
<i>Ilustración 21: Sistema pila de combustible de 80kW [45].</i>	38
<i>Ilustración 22: Proceso de fabricación del PEMFC stack[46].</i>	42
<i>Ilustración 23: Comparación costes estimados de la síntesis del catalizador entre 2017 y 2018[45].</i>	43
<i>Ilustración 24: Comparación preliminar del coste estimado de fabricación de un catalizador de referencia con uno que emplea PVD [45].</i>	43
<i>Ilustración 25: Gráfica comparativa del coste del material de refuerzo de la membrana[45].</i>	44
<i>Ilustración 26: Gráfica comparativa del coste del material de la membrana[45].</i>	44
<i>Ilustración 27: Gráfica de estimación de costes de los materiales y revestimiento del cátodo[45].</i>	45
<i>Ilustración 28: Gráfica de estimación costes del ensamblaje del electrolito[45].</i>	45
<i>Ilustración 29: Estimación de coste del sistema actual y futuro según la tasa de producción anual [45].</i>	46
<i>Ilustración 30: Estimación de costes del sistema de pila de combustible para una producción de 500.000 sistemas al año [45].</i>	47
<i>Ilustración 31: Desglose del coste por componente del stack de la pila de combustible [49].</i>	47
<i>Ilustración 32: Desglose de cada componente del sistema para un volumen de producción de 500.000 unidades al año (2017) [44].</i>	48
<i>Ilustración 33: Costes (\$/kg H2) de la producción de hidrógeno según la fuente de producción (2018)[51].</i>	

	50
<i>Ilustración 34: Costes de producción del hidrógeno según las fuentes de producción (2030)[26].</i>	50
<i>Ilustración 35: Desglose del coste de un FCEV[50].</i>	51
<i>Ilustración 36: Coste del ciclo de vida de un FCEV (2018)[50].</i>	51
<i>Ilustración 37: Variación del coste del ciclo de vida con respecto a la eficiencia[50].</i>	51
<i>Ilustración 38: Coste del ciclo de vida de un FCEV (2025)[50].</i>	52
<i>Ilustración 39: Coste total de propiedad según el rango y el tipo de vehículo[26].</i>	53
<i>Ilustración 40: Desglose del coste total de la propiedad (\$/100kms) de un autobús según el tipo de vehículo[52].</i>	54
<i>Ilustración 41: Desglose del coste de operación (\$/100kms) de un autobús (2019)[52].</i>	54
<i>Ilustración 42: Proyección de futuro del coste total de propiedad (\$/100kms) de un autobús según su sistema de propulsión [52].</i>	55
<i>Ilustración 43: Pérdidas de voltaje en la pila de combustible [55].</i>	56
<i>Ilustración 44: Curva de polarización y pérdidas en la pila de combustible [55].</i>	57
<i>Ilustración 45: Curva de polarización para las condiciones de referencia [53].</i>	57
<i>Ilustración 46: Curvas de polarización para las diferentes pruebas de temperatura [53].</i>	59
<i>Ilustración 47: Curvas de polarización para las diferentes pruebas de presión [53].</i>	61
<i>Ilustración 48: Curvas de polarización para las diferentes pruebas de estequiometría del cátodo [53].</i>	64
<i>Ilustración 49: Diagrama de tornado del coste del sistema de un automóvil [50].</i>	66

Notación

TCO	Total Cost f Ownership
FCEVs	Fuel Cell Electric Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
BEVs	Battery Electric Vehicles
PEM	Proton Exchange electrolyte Membrane
IEA	Agencia Internacional de la Energía
STEPS	Stated Policies Scenario
DRS	Delayed Recovery Scenario
COP21	Conferencia sobre el Clima de París
DOE	Departament of Energy
ERA	European Research Area
BOP	Balance of Plant
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
MEA	Membrane electrode assembly
CCM	Catalyst-Coated Membrane
HSC	High Surface Carbon
BPP	Bipolar Plates
GDL	Gas Diffusion Layer

1 INTRODUCCIÓN

1.1 El hidrógeno como combustible.

1.1.1 Contexto histórico.

El hidrógeno es el elemento químico más ligero de la tabla periódica, se representa con el símbolo H y es el elemento más abundante del universo ya que constituye un 90% de su peso. Fue descubierto como elemento químico en 1766 por Henry Cavendish, aunque con anterioridad ya se habían realizado algunos estudios acerca de este elemento [1].

Más adelante, en 1783, Antoine Lavoisier dio el nombre a dicho elemento químico, cuyo nombre proviene de la unión de “hydro” (agua) y genes, es decir, “generador de agua” debido a que demostró la formación de agua mediante la quema de hidrógeno.

En ese mismo año, el hidrógeno proporcionaba una manera fiable de realizar viajes aéreos. Jacques Alexander Cesar Charles lanzó el primer globo aerostático no tripulado impulsado por hidrógeno. Ferdinand von Zeppelin fomentó la idea de utilizar el hidrógeno en dirigibles rígidos, que fueron nombrados zepelines, cuyo primer vuelo se realizó en el año 1900. Se normalizó el uso de los zepelines desde 1910 para el transporte de pasajeros y como plataformas de observación y bombarderos durante la guerra. Hasta que en 1937 tuvo lugar el accidente del dirigible Hindenburg, que fue destruido en un vuelo sobre Nueva Jersey. Se le atribuyó la chispa causante del accidente a una fuga de hidrógeno, aunque posteriormente una serie de investigaciones señalaron que dicha ignición se debió a la electricidad estática. Este suceso supuso un antes y un después en el uso de hidrógeno como combustible.

En el año 1800 el científico William Nicholson descubre que, al emplear una corriente eléctrica en el agua, se consigue hidrógeno y oxígeno. Este hecho se descubre imprevistamente mientras se realizaba un estudio sobre las baterías y se llamó electrólisis. Michael Faraday desarrolló este proceso en 1834 y publicó una serie de leyes acerca de la electrólisis que llevan su nombre [2].

Christian Friedrich Schönbein fue un químico germano-suizo que en 1838 descubre los inicios de la pila de combustible, la obtención de electricidad a través de la combinación de oxígeno e hidrógeno. Aunque la idea de la conversión de energía química en electricidad fue demostrada por Sir William Grove en 1839, mediante la célula eléctrica llamada célula de Grove. En 1842, desarrolla la primera célula de combustible que era capaz de originar energía eléctrica gracias a la combinación del hidrógeno y el oxígeno, completando así los estudios de Christian Friedrich [3].

No sería hasta el año 1889 cuando Ludwig Mond y Charles Langer establecieron la expresión “celda de combustible” al montar una celda a partir de aire y gas síntesis (mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono). El hidrógeno logró licuarse por primera vez gracias a James Dewar en 1898 al usar refrigeración regenerativa, que se realizó a una temperatura aproximada de 20,4K [4].

En 1920 se comienzan a desarrollar ideas acerca de automóviles y máquinas con el hidrógeno como fuente principal de energía. Rudolf Erren se hace con la patente para fabricar un motor de combustión interna que sea capaz de funcionar empleando hidrógeno. En 1930, diez años más tarde, fabrica el primer prototipo de automóvil movido por hidrógeno.

La primera celda de combustible práctica fue construida por Francis Bacon en 1959, trabajaba mediante una mezcla de aire con hidrógeno y daba una potencia de 5kW. Utilizarían esta celda en el programa Apollo de la NASA. En 1968 la NASA realiza un análisis económico del hidrógeno líquido a gran escala.

Después de la crisis energética de 1973, la población se dio cuenta que los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo o el gas natural, más tarde o más temprano se iban a ir terminando. Por ello, se crean investigaciones energéticas en busca de posibles fuentes de energía para sustituir a los combustibles fósiles. El interés de esta búsqueda fue incrementado por el impacto negativo que tienen los combustibles fósiles sobre el medio ambiente y el incesante incremento de demanda energética. El hidrógeno se posiciona como una de las mejores opciones

debido a sus características únicas, además se fomenta el uso de las pilas de combustibles comerciales debido al embargo de crudo de la Organización de Países Exportadores de Petróleo en ese mismo año [5].

Al año siguiente, se realiza un congreso internacional basado en la economía del hidrógeno, “The Hydrogen Economy Miami Conference”. De este congreso nace la Asociación Internacional de la Energía del Hidrógeno cuyo objetivo era desarrollar las tecnologías basadas en el hidrógeno.

En la industria del automóvil, en concreto con el AMC Gremlin entre 1970 y 1980, se empiezan a realizar experimentos con motores alternativos, movidos por hidrógeno, gas natural o electricidad. Este coche compacto ayudó a realizar múltiples pruebas en universidades norteamericanas [6].

Aunque los primeros intentos de la integración de vehículos con pilas de hidrógeno fueran tan pronto como el tractor de Allis-Chalmers en 1959 o la GM Electrovan en 1966. Estos vehículos no presentaban ninguna ventaja a considerar sobre los vehículos con motores de combustión o los eléctricos. Esto se debía a la baja densidad de las pilas de combustible alcalinas de aquella época.



Ilustración 1: Primera furgoneta propulsada por una pila de combustible de hidrógeno con un electrolito alcalino [7].

Los nuevos materiales del electrolito para las pilas de combustible del tipo PEM ofrecieron la posibilidad de crear pilas más livianas y compactas. Gracias al desarrollo de las pilas de combustible por Daimler-Benz y al aumento de la importancia medioambiental, en la década de 1990, varias compañías de coches empezaron a tener en cuenta el desarrollo de coches propulsados con pilas de combustible PEM. Buscaban eliminar los coches del debate medioambiental ya que se conseguirían vehículos completamente libres de emisiones.

En 1999, Benz lanza al mercado un prototipo de coche compacto con pequeñas pilas de combustible el Necar 4. Se decía en aquella época que el coche como tal ya estaba desarrollado y solo quedaba reducir su costo. Honda comercializó su primer vehículo, el FCX Clarity, en Estados Unidos y Japón en el año 2008.

Toyota presenta en 2014 la producción del Toyota Mirai, vehículo de 4 plazas empujado por un motor eléctrico sustentado por una pila de combustible alimentada con hidrógeno. El sistema de pilas de combustible de Toyota tiene una alta eficiencia energética en comparación con los motores de combustión interna convencionales, además de un mejor desempeño medioambiental gracias a las cero emisiones de CO₂ y otros contaminantes durante su puesta en marcha.

Como se observa en la ilustración a continuación, primero entra aire a través de unas tomas de aire en la parte frontal del vehículo. De este aire se busca el oxígeno que reacciona con el hidrógeno, procedente del tanque presurizado, en la pila de combustible generando electricidad. Esta electricidad es la que alimenta el motor y hace que el vehículo se mueva. El vehículo cuenta con una unidad de control que determina cuando se carga o descarga la batería para alimentar al motor, es decir, cuando la energía eléctrica generada por la pila de combustible no sea suficiente se apoya en energía acumulada en una batería. El motor tiene una potencia máxima de 113 kW y un par máximo de 335 Nm y lo único que emite el vehículo es agua procedente de la pila de combustible.

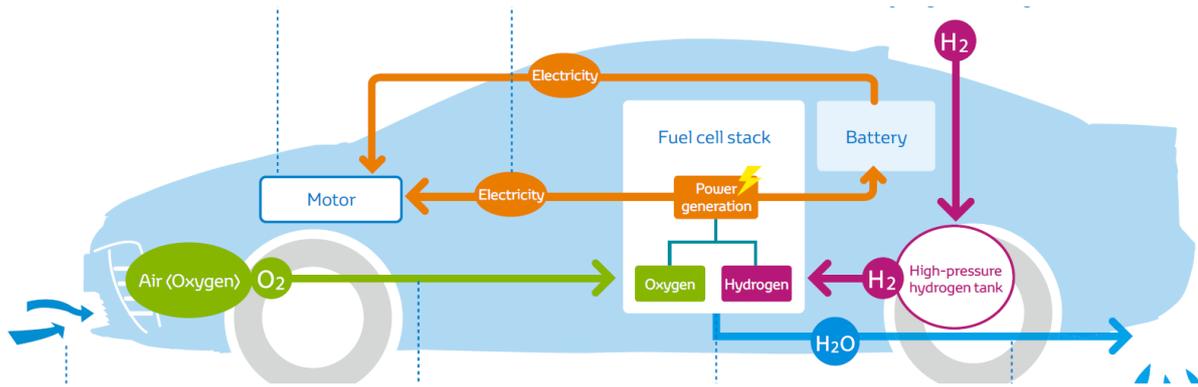


Ilustración 2: Componentes Toyota Mirai [8].

Este vehículo presentaba una serie de mejoras significativas en las prestaciones de todos sus componentes principales con respecto a sus modelos anteriores. Bajando el centro de gravedad y mejorando la aerodinámica consiguió mejorar la aceleración y la insonoridad interior consiguiendo un gran confort de marcha. Se consiguieron muchos avances tecnológicos en las pilas de combustible, que lograron unos nuevos stacks más ligeros, más pequeños y con mejor rendimiento. Por ejemplo, añadir un convertidor de carga que elevaba el voltaje del motor a 650 V de máximo, reducía el número de celdas en cada stack, bajaba el tamaño y peso del sistema, además de permitir el uso de motores y unidades de control de híbridos que ya existían reduciendo así los costes. Mejorar la salida del agua producida por la pila y la difusión del aire de entrada también fue posible, gracias a un cambio en el diseño de los canales de flujo de la pila. Con esto se lograba una alta densidad de corriente mejorando tanto la uniformidad de generación en las superficies como la capacidad de respuesta del electrodo. Otro avance a tener en cuenta fue la eliminación del humidificador externo, reduciendo así el peso en 13 kg y el tamaño en 15L. Esto se consiguió recirculando el vapor de agua producido por la pila, necesario para mantener el rendimiento de la conductividad de protones en la membrana. Todo ello contribuye una serie de cambios en el stack como se observa en la siguiente ilustración, el más significativo es a un aumento de la densidad de potencia del stack de 1,4kW/L que era en 2008 hasta un 3,1kW/L en 2014.

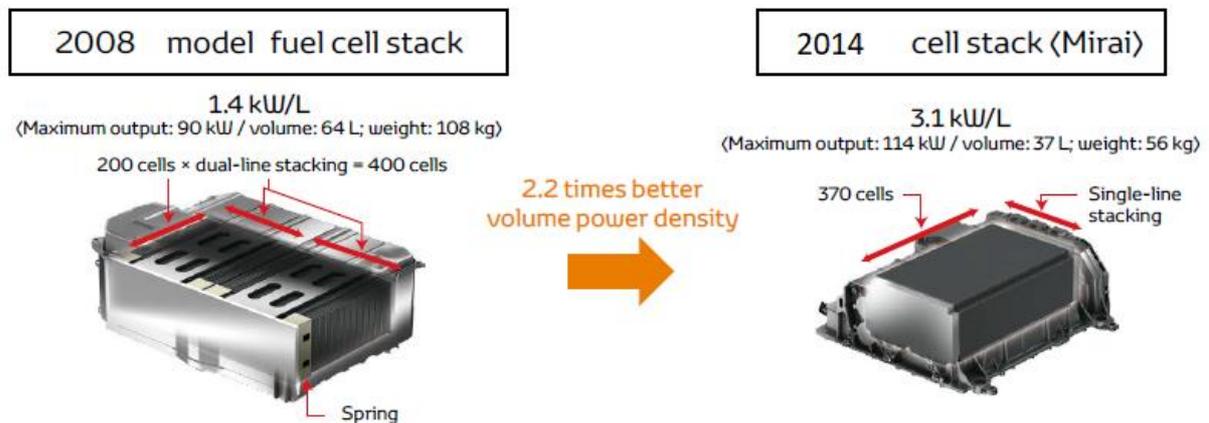


Ilustración 3: Comparativa stacks Toyota Mirai [8].

En 2018 Hyundai presenta el modelo Nexo, que sobrepasó el récord establecido en aceleración, velocidad máxima y autonomía. Mercedes a finales de 2018, ofrecía como alquiler su coche GLC F-CELL con el objetivo de obtener información y experiencia con este tipo de tecnología; en 2020 abandonó este experimento para centrarse en vehículos de gran tamaño y peso, como autobuses y camiones, llegando a un acuerdo con Volvo para desarrollar este tipo de vehículos. En 2019, Bmw lanzó el hydrogen Next, un prototipo de SUV alimentado por hidrógeno. Está basado en el BMW X5 y se estima que llegará al mercado en 2022, dado que se acaban de realizar recientemente sus primeras pruebas por carreteras europeas [9], [10], [11].

Como se puede observar, las pilas de combustible de hidrógeno son de gran relevancia en la actualidad en el ámbito de la automoción y están en el punto de mira de numerosas empresas. Sin tener en cuenta la amplia variedad de uso que pueden tener estas pilas en otros sectores industriales, como se comenta más adelante.

1.1.2 Características del hidrógeno.

A medida que se acerca el final de la era de los combustibles fósiles, resulta obvio que se tiene que fabricar un combustible sintéticamente y de forma sostenible en un futuro. Esta idea proporciona a la humanidad la oportunidad de escoger cuál es la mejor alternativa posible. Este combustible tiene que seguir unos criterios como un buen combustible para su transporte, tiene que tener una buena eficiencia, debe ser compatible con el medio ambiente, tiene que ser versátil con gran facilidad de transformarse en diferentes tipos de energía, debe ser seguro de utilizar sin asumir grandes riesgos y lo más barato posible [5].

El hidrógeno se identifica como una tecnología interesante para investigar por diferentes motivos. Su ventaja más relevante es que su combustión origina únicamente agua, lo que significa que no emite gases de efecto invernadero, como pasa con los combustibles fósiles e incluso con la biomasa. El inconveniente del hidrógeno es que no es un combustible primario, es decir, no se encuentra en estado puro y ha de ser producido con otros combustibles aportándole energía. Por ello, el hidrógeno se considera un vector energético utilizado tanto para el transporte como para el almacenaje de energía.

Al funcionar como vector capaz de almacenar energía se transforma en una alternativa a las baterías para acumular la energía de las fuentes renovables como la eólica o la solar. El hidrógeno producido a partir de estas energías se considera un combustible completamente limpio y acorde con el medio ambiente.

Una propiedad que lo representa es la gran energía específica de su combustión cuyo valor es del orden de 120 megajulios por kg, bastante superior a los 50 del gas natural o a los 44,6 del petróleo. Esta propiedad se contrasta con la baja densidad que tiene tanto en estado líquido como gaseoso que dificultan su almacenamiento para aplicaciones automovilísticas [12].

La característica principal que tiene el hidrógeno que lo convierte en un gran vector energético es su versatilidad, ya que puede producirse mediante cualquier fuente de energía primaria y puede transformarse en diferentes formas de energía para distintas aplicaciones como se esquematiza en la siguiente figura:

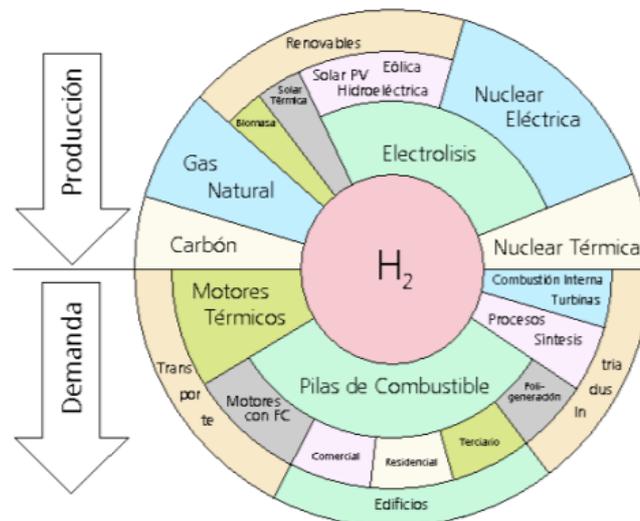


Ilustración 4: Esquema que muestra la variedad de aplicaciones del hidrógeno [13].

Otras características del hidrógeno son que tiene gran eficiencia al convertirlo en electricidad, que se obtiene gracias al agua mediante electrólisis y un aporte energético, que se puede almacenar en los tres estados de la materia y que se puede transportar grandes distancias ya sea con tuberías o mediante camiones.

En conclusión, se puede confirmar que el hidrógeno es un vector energético limpio, seguro y eficiente que complementa el abastecimiento de suministro energético de la población y anima al uso de energías renovables [13].

1.2 Panorama energético.

1.2.1 Demanda energética global.

Existe una tendencia indiscutible hacia el aumento de la demanda energética, este aumento suele ir ligado a un incremento del nivel de vida medio de las personas y al crecimiento demográfico. Este crecimiento de la demanda se concentra en países con una economía en expansión en primer lugar, seguido de países en vías de desarrollo.

El Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la ONU realiza el informe "Revisión a 2018 de las Perspectivas de Urbanización Mundial", en el cual estima que la población que reside en áreas urbanas sumará en torno a 2.500 millones de personas en el año 2050. Ese crecimiento poblacional se agrupará en Asia y África, destacan la India, China y Nigeria. Resulta obvio que proporcionar acceso a la energía a esta nueva parte de la población provocará un incremento notable en la demanda energética [13].

Es preciso nombrar que en marzo de 2020 y hasta el momento estamos sufriendo los efectos de una pandemia por Covid-19. No solo afectan a la salud sino también provoca un impacto negativo en la economía global, por tanto, en el consumo energético de sectores como la industria o el transporte.

Esta pandemia ha provocado un descenso de la demanda energética del 8% en 2020 y continúa fluctuando entre un 6% y 8% por debajo de lo estimado hasta 2050. En contrapartida, se registra una reducción del 8% de las emisiones de los gases de efecto invernadero [14].

Según la Agencia Internacional de la Energía la demanda de energía global volverá al nivel de antes de la crisis en 2023 en STEPS (escenario en el que se tiene bajo control el Covid-19 antes de 2021) o en el año 2025 en DRS (escenario en el que se tiene bajo control el Covid-19 antes de 2023). Antes de la crisis, la demanda energética estaba planeada en un crecimiento del 12% entre 2019 y 2030. Este crecimiento se ha visto mermado por la crisis a un 9% en STEPS y a un 4% en DRS. Con la demanda de las economías avanzadas mermadas, el único incremento proviene de economías en desarrollo, liderados por la India [15].

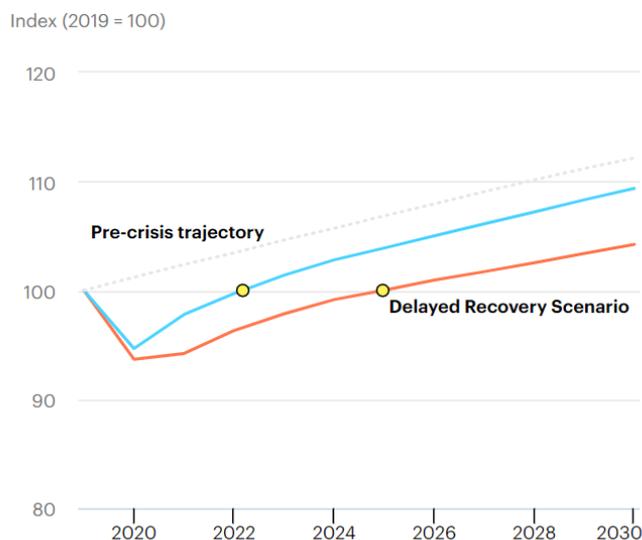


Ilustración 5: Demanda de energía primaria global según cada escenario [15].

1.2.2 Emisiones de CO2.

Como se ha comentado en el apartado anterior la pandemia provocada por el Covid-19 y su consecuente crisis económica, ha tenido un impacto en la reducción del uso de combustibles fósiles que viene ligado a la reducción de las emisiones de CO2. Tanto energías renovables como vehículos eléctricos no han tenido mucho cambio durante la pandemia.

Las emisiones de CO2 han caído un 5,8% de acuerdo con los últimos datos estadísticos, la mayor disminución porcentual anual desde la Segunda Guerra Mundial. Las emisiones han caído casi 2000 millones de toneladas

hablando en términos absolutos, equivale a quitar las emisiones totales de la Unión Europea durante todo el año. La demanda de combustibles fósiles ha tenido una de las caídas más duras, el petróleo en torno al 8,6% y el carbón un 4%, la caída anual del uso petróleo más grande de la historia. Mientras que las energías renovables, como la solar o la fotovoltaica, alcanzan su participación anual más alta del orden del 20%.

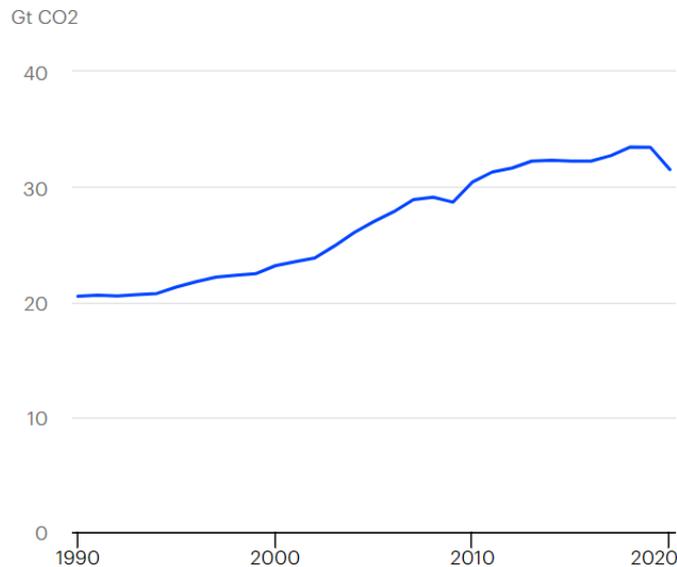


Ilustración 6: Emisiones de CO2 procedentes del uso de energía global [16].

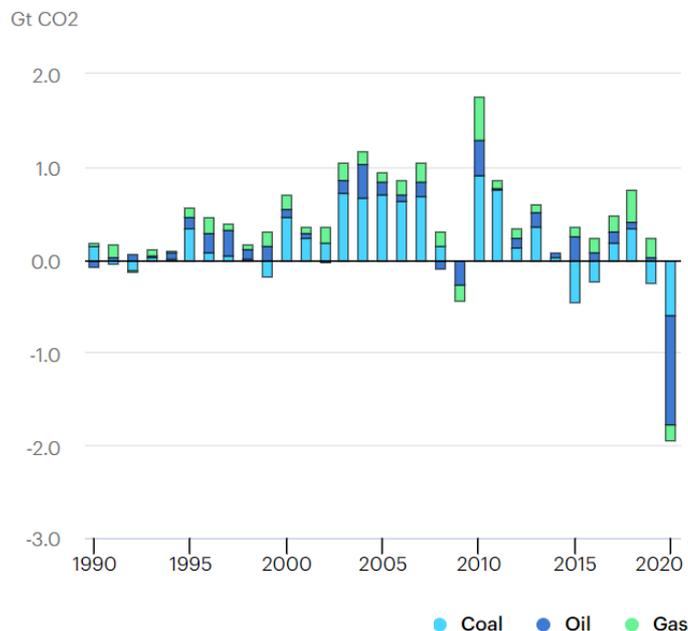


Ilustración 7: Cambios en las emisiones de CO2 por combustible asociado [16].

La pandemia ha provocado el mayor impacto en el sector del transporte debido a las medidas de bloqueo, tales como la restricción en la movilidad a nivel local e internacional o varias indicaciones a la hora de viajar, así como restricciones fronterizas. La disminución de las emisiones de CO2 por el uso del petróleo en el transporte representa un 50% de la caída global de todas las emisiones de CO2 en 2020, cayeron en torno a 1100Mt de CO2 lo que supone un 14% menos que en 2019. La actividad de vuelos globales ha estado un 70% por debajo que el año anterior lo que supone una caída de las emisiones procedentes de la aviación de 265 MT de CO2 que son un 45% menos que en 2019. A finales de 2020 la recuperación en la actividad del transporte supone un repunte en las emisiones, principalmente en países con economías emergentes como son India, China, Brasil,

Sudáfrica o Indonesia.

En la Unión Europea las emisiones anuales de CO₂ se vieron reducidas en un 10% en relación con 2019, debido a las variadas restricciones y cierres en casi todos los estados miembros. La menor demanda de electricidad y un aumento del 8% en la producción de energías renovables provocaron una disminución del 20% en la generación de energía a base de carbón. Como resultado, la participación de las energías renovables en la generación de electricidad aumentó hasta un 39% en 2020, un 4% mayor que en 2019. La demanda de petróleo para el transporte se desplomó un 12% provocado por las medidas de restricción en la circulación de vehículos [16].

1.2.3 Acuerdo de París.

A pesar de la disminución de las emisiones de CO₂ consecuencia de la pandemia ya mencionada, no se alcanzan los objetivos que se marcaron en el Acuerdo de París, adoptado el 12 de diciembre de 2015 en la Conferencia sobre el Clima de París (COP21). Este acuerdo es el primer acuerdo universal y jurídicamente vinculante sobre el cambio climático.

El Acuerdo de París es un hito histórico en la lucha contra el cambio climático, gran parte de la ciudadanía y diferentes representantes de ámbito internacional se movilizaron por la causa. Aunque intereses económicos y políticos de países como EEUU o China limitaron la fuerza legal del texto, ha sido un punto de inflexión fundamental para el impulso de un desarrollo bajo en emisiones, resiliente al clima y sostenible.

Contó con la asistencia de 150 jefes de Estado y un total de casi 190 países mostraron propuestas nacionales de contribuciones climáticas, cubriendo más del 95% de las emisiones. Este acuerdo entró en vigor el 4 de noviembre de 2016, necesitaba que 55 países que representasen al menos 55% de las emisiones mundiales depositaran instrumentos de ratificación.

Los países del mundo se comprometieron a mantener el aumento de la temperatura por debajo de los 2°C de máximo y esforzarse para que no supere 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales. El Acuerdo incluye un ciclo de revisión que tendrá su primer balance mundial en 2023 y después una revisión cada 5 años.

En 2018, las contribuciones nacionales de los países que se hicieron en el Acuerdo de París para reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero fueron solo la tercera parte de las necesarias para impedir las consecuencias del cambio climático. Las emisiones globales de gases de efecto invernadero eran 51,9 gigatoneladas de CO₂-equivalente en 2016, para cumplir con los objetivos se tiene que reducir a 42 gigatoneladas de CO₂-equivalente para 2030.

Esto explica la necesidad de no solo de cumplir con los objetivos sino también tener en cierta medida una ambición para ampliarlos, de manera que se cumplan los compromisos de reducción de emisiones por la mayoría de países posibles [17],[18],[19], [20].

1.2.4 Situación nacional.

La estructura actual española en relación al clima y a la energía está basada en intentar conseguir los objetivos de neutralidad climática propuestos por la Comisión Europea en 2018. Dichos objetivos persiguen una economía próspera, moderna y competitiva a largo plazo (2050). Por tanto, España está centrada en el desarrollo masivo de las energías renovables, como la solar y la eólica y también en la mejora de la eficiencia energética [21].

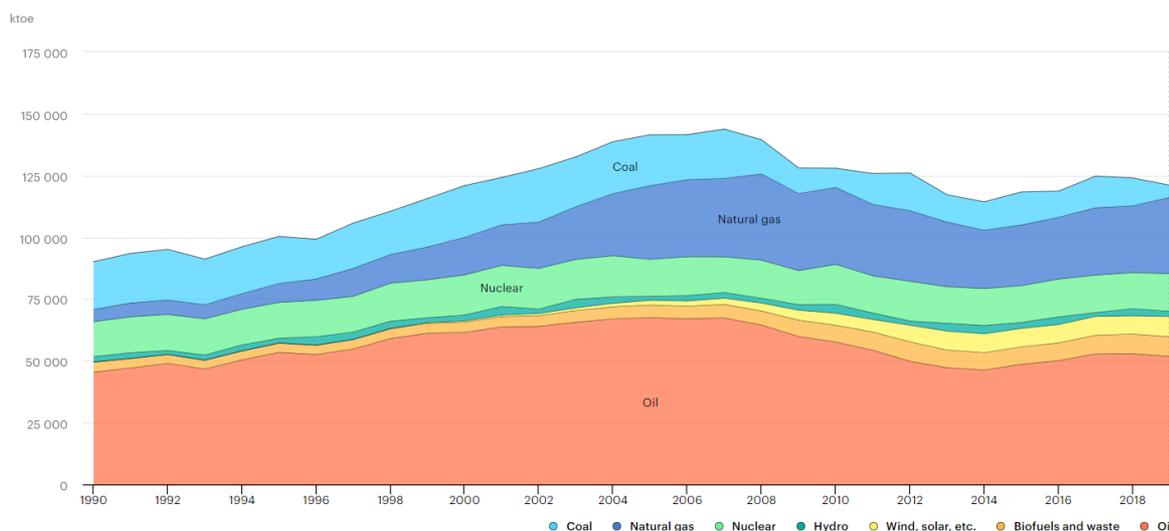


Ilustración 8: Suministro total de energía anual según procedencia [22].

Aunque el abastecimiento energético total de España siga dominado por combustibles fósiles, sobre todo en los sectores de la construcción, el transporte y la industria, se observa en la ilustración superior una tendencia clara hacia la descarbonización y una eliminación gradual del uso de energía nuclear. Actualmente, España progresa adecuadamente hacia sus objetivos para 2030, en especial en el sector eléctrico [22].

El 6 de octubre de 2020, se aprueba la “Hoja de Ruta del Hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable” por el Consejo de Ministros, a propuesta del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. El hidrógeno verde, también llamado hidrógeno renovable, es el que ha sido generado a partir de electricidad procedente de energías renovables, mediante un proceso de electrólisis. La Hoja de Ruta está centrada en el desarrollo de este tipo de hidrógeno, con el objetivo de posicionar a España como un referente tecnológico en la producción y aprovechamiento del hidrógeno renovable.

Esta Hoja de Ruta va en consonancia con el “Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC)” y con el proyecto de “Ley de Cambio Climático y Transición Energética”, enviado a las Cortes el 19 de mayo de 2020 por el Consejo de Ministros. Los cuales fomentan la implementación de gases renovables en el país, entre los que se incluye el hidrógeno renovable.

Como ya he comentado en puntos anteriores, el hidrógeno es considerado un vector energético. La Hoja de Ruta lo identifica como una solución sostenible de gran importancia para la descarbonización de la economía y el progreso de cadenas de valor industriales y de I+D+i, siendo un elemento clave para la reactivación económica ligada a la transición energética.

La producción y el consumo del hidrógeno renovables no produce emisiones contaminantes y es neutral climáticamente. Además, proporciona la capacidad de integrar los excedentes de electricidad renovable generados en las horas donde el consumo es menor, añadiendo versatilidad a su uso gracias a la capacidad de almacenamiento de esta energía. Un aumento de la presencia de energías renovables en el sistema trae consigo una serie de efectos positivos, tanto en competitividad industrial como en los precios de la electricidad.

Al no producir emisiones contaminantes, se destaca el papel del hidrógeno renovable en la descarbonización de procesos de mayor complejidad, como los procesos industriales que requieren elevadas temperaturas o el sector de transporte aéreo. Junto a esto, se debe mencionar su importancia en la eliminación de gases de efecto invernadero producidos por el transporte, el sector industrial y la generación de energía convencional.

Para garantizar la contribución del hidrógeno renovable se plantean una serie de objetivos nacionales para 2030:

- Producción de hidrógeno: Instalación mínima de 4 GW de potencia de electrolizadores. Con un hito intermedio para 2024 de potencia instalada entre 300 y 600 MW.
- Industria: Se estima una contribución mínima del hidrógeno renovable del 25% respecto al total consumido en 2030. Actualmente la mayoría es hidrógeno de origen fósil.
- Transporte: Con respecto a la movilidad, se intentará conseguir para 2030 un número de autobuses que

funcionen con pilas de combustible de hidrógeno renovable entre 150 y 200, para el transporte de mercancías entre 5000 y 7000 vehículos ligeros y pesados y al menos dos líneas comerciales que funcionen con trenes propulsados con hidrógeno. Para ello, se instalará una red de al menos 100-150 hidrogeneras de acceso público para facilitar el repostaje.

- Impacto ambiental: Reducir las emisiones de 4,6 millones de toneladas equivalentes de CO₂.

En base a estos objetivos, se diseña una visión para el año 2050, constituida por una sociedad completamente descarbonizada en la que las energías renovables supongan el mayor aporte energético. De esta manera se garantiza el abastecimiento energético de calidad y con precios competitivos.

En la Hoja de Ruta se plantean un total de 60 medidas, referidas al impulso de la I+D+i, otras con carácter transversal que tratan de implementar información del hidrógeno renovable en la sociedad. También se recogen medidas regulatorias, que aluden a una simplificación administrativa. Por último, se observan medidas de carácter sectorial, que tratan de impulsar aplicaciones del hidrógeno renovable en sectores como el transporte, en la industria o incluso buscan la integración de vectores energéticos [23].

1.2.5 Situación europea.

La transición europea hacia un sistema de energía descarbonizado está en camino, aunque requiere una transformación drástica de cómo se genera, distribuye, almacena y consume la energía en la Unión Europea. Necesita poder generar energía sin la necesidad del empleo de carbono, aumentar la eficiencia energética y una profunda descarbonización de los sectores de transporte, de construcción y de industria. Para ello, deben ser capaces de reducir las emisiones de CO₂ 770 megatoneladas anuales para 2050. El Panel Intergubernamental del Cambio Climático, también nombrado IPCC, apunta que para no exceder los 1,5°C propuestos en el Acuerdo de París las emisiones deben caer un 45%, comparado con las emisiones de 2010, para el año 2030. Consecuencias posibles del impacto en el cambio climático podrían ser el incremento del nivel del mar, pérdidas de diferentes biodiversidades o temperaturas extremas.

El combustible idóneo para realizar esta descarbonización es el hidrógeno, como se ha comentado en puntos anteriores este combustible ofrece bastante versatilidad y es un vector energético muy flexible para la integración de las energías renovables.

En el informe “Hydrogen Roadmap Europe” muestran un posible escenario del empleo del hidrógeno en la Unión Europea para lograr el objetivo de mantener el aumento de la temperatura por debajo de los 2°C, este escenario está basado en datos de 17 miembros de diferentes compañías activas en las tecnologías de las pilas de combustible y uso del hidrógeno. Según se muestra en la ilustración a continuación, el hidrógeno podría proporcionar un 24% de la demanda energética total para 2050:

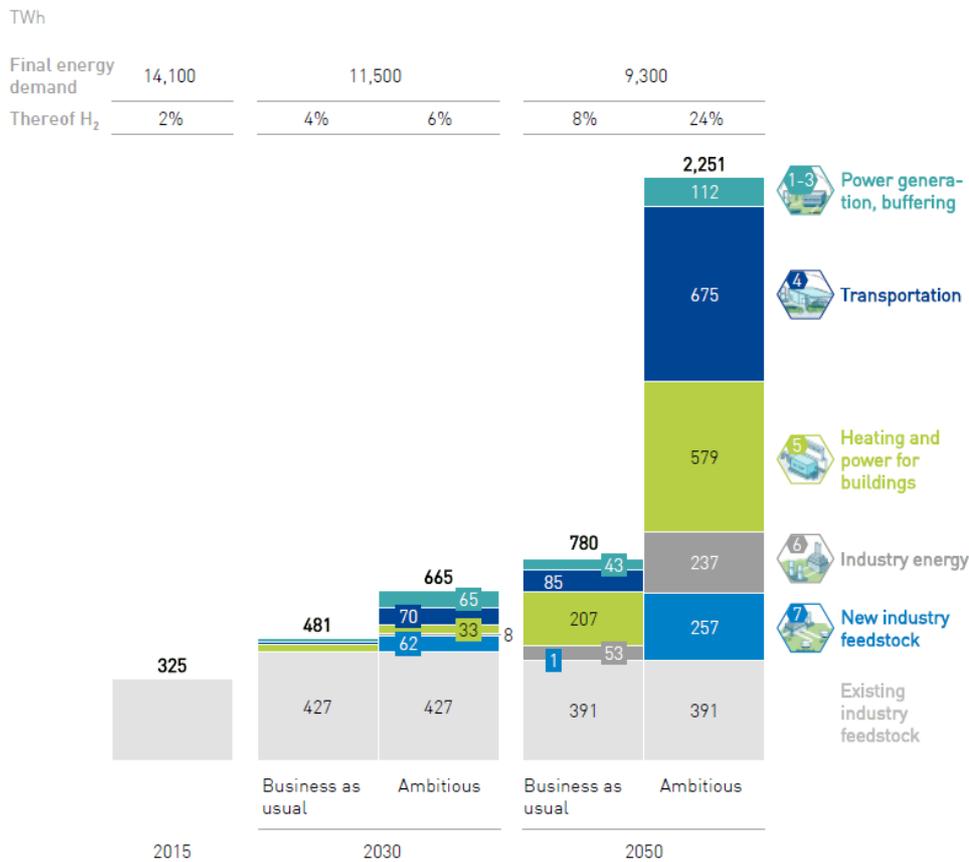


Ilustración 9: Escenario posible de implementación del hidrógeno en los diferentes sectores industriales [24].

Hacer realidad este escenario supondría un gran paso en la industria, se podría generar en torno a 2250 TWh gracias al hidrógeno, lo que supondría una cuarta parte de la demanda total de la Unión Europea. Sin embargo, sería necesaria una implementación rápida del hidrógeno y las pilas de combustible en la industria para reducir los costes de los mismos con la economía de escala. La implementación de este tipo de tecnologías no solo busca la reducción de emisiones sino también una mejora económica global como se muestra en la ilustración siguiente, por ello para 2030 la Unión Europea debería centrarse en la implementación de las pilas en uso comercial como vehículos de pasajeros o también en la descarbonización de la producción de hidrógeno ya existente.

Ambitious scenario
2050 hydrogen vision



Ilustración 10: Beneficios del hidrógeno para la Unión Europea [24].

1.2.6 Energías renovables.

Las energías renovables se encuentran en crecimiento constante y relativamente rápido debido a que se están focalizando recursos de muchos países en investigación y desarrollo de las mismas. Gracias a las políticas de apoyo de los gobiernos y a la maduración de este tipo de tecnología, se está consiguiendo una gran reducción del coste facilitando su implementación en el mercado de la generación de energía eléctrica. La energía solar

fotovoltaica tiene menor costo de implementación que las nuevas centrales eléctricas de carbón o gas en la mayoría de los países, además de ofrecer uno de los menores costes de electricidad nunca vistos. Según un estudio de la IEA, las energías renovables cubren el 80% del crecimiento de la demanda mundial de electricidad hasta 2030 [25].

La principal fuente de energía renovable es la hidroeléctrica, aunque la energía solar con los recientes desarrollos está convirtiéndose en el centro de atención debido a su rápido crecimiento, seguida de la energía eólica.

El almacenamiento de esta energía supone un papel cada vez más importante para garantizar la flexibilidad del funcionamiento de estos sistemas de producción, ya que se trata de una producción de electricidad de forma intermitente e incontrolable en algunos casos. La India se ha convertido en el mercado más grande para el almacenamiento de energía mediante baterías, aunque son relativamente caras para la capacidad de almacenamiento que proporcionan debido a su baja densidad energética. Otra forma de almacenar energía es, como ya se ha comentado con anterioridad, transformando el exceso de energía en hidrógeno limpio; un informe de la IEA encuentra que actualmente, con una expansión a nivel mundial de las políticas y proyectos relacionados con el hidrógeno limpio, es el momento de desarrollar las tecnologías y disminuir los costos para permitir que el hidrógeno se utilice ampliamente [26].

Por ejemplo, en el lado de la oferta, la energía solar y la energía eólica muestran grandes variaciones a corto y a largo plazo; sumado a que, en el lado de la demanda, existen variaciones horarias, diarias e incluso según temporadas bastante significativas. Este perfil de las energías renovables tan variable requiere de un cierto equilibrio tanto a corto como a largo plazo. Se necesitan mecanismos para estabilizar la red, proporcionando energía en periodos de baja producción de energías renovables cuando la demanda energética es alta y absorbiendo el exceso de energía en periodos cuya producción es mayor que la demanda.

Existen varias opciones para equilibrar estas diferencias entre la oferta y la demanda, desde apagar generadores eólicos mientras se encuentran en exceso, hasta encender generadores auxiliares convencionales cuando necesitan energía adicional, aunque están limitados por sus emisiones contaminantes y su tiempo de respuesta. Una alternativa competente es utilizar el exceso de energía de las renovables en poder calorífico, con el uso de calderas eléctricas o bombas de calor; esta técnica es ampliamente eficiente, sin embargo, normalmente la demanda de calor y el exceso de las renovables no coinciden, lo que no proporciona gran estabilidad. Además de la dificultad añadida que conlleva almacenar el calor durante largos periodos de tiempo sin que se degrade.

Transformar el exceso de energía en gas se presenta como la solución para añadir flexibilidad al sistema de las energías renovables. Convertir la energía en hidrógeno mediante la electrólisis es una opción con bastante rentabilidad, que permite estabilizar el sistema energético sin grandes pérdidas. Proporciona la misma flexibilidad que el gas natural, pero sin las emisiones de CO₂ y si hace uso de las infraestructuras existentes, puede suponer un medio de distribución y almacenamiento de energía muy eficiente. El hidrógeno puede ser almacenado durante largos periodos de tiempo y con un precio a gran escala realmente competitivo comparado con las formas de almacenamiento convencionales, como centrales hidroeléctricas reversibles o baterías.

En conclusión, el hidrógeno proporciona un mecanismo crucial para garantizar la transición del sistema energético, debido a que añade una versatilidad necesaria que deja a paso a una mayor entrada de energías renovables en el sistema [24].

1.2.7 Políticas internacionales.

Como ocurre con la mayoría de las innovaciones tecnológicas, las fases iniciales de desarrollo y despliegue suelen depender de las políticas gubernamentales y sus iniciativas. Se han creado planes estratégicos en países como China, Japón, Estados Unidos y en general por toda Europa, en los que se invierte en investigación y desarrollo de las pilas de combustible, estableciendo subvenciones a medio y a largo plazo.

A continuación, se muestra una tabla a modo de resumen del enfoque político que ha tomado cada país y Europa:

Tabla 1: Resumen general políticas de los principales mercados [27].

	Estados Unidos	China	Europa	Japón
Estrategia nacional	<ul style="list-style-type: none"> ❖ En 1990 el gobierno estadounidense publicó “Hydrogen Research, Development And Demonstration Act”, donde exponía un plan para la investigación y desarrollo del hidrógeno como energía de 5 años. ❖ Ha formado un conjunto de leyes, políticas y planes de investigación para incentivar el uso de hidrógeno como energía. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Aunque relativamente tarde en comparación con otros países, China está poniendo especial atención en el hidrógeno. ❖ En el plan de estrategia e innovación tecnológica de 2016, el hidrógeno fue nombrado como uno de las 15 áreas clave. ❖ En 2019, durante “Two Sessions” el hidrógeno fue escrito en el informe de trabajo del gobierno por primera vez. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ En 2003, como conjunto los países de la Unión Europea lanzaron el “European Research Area”, proyecto que incluía la construcción de una plataforma para investigación y desarrollo de las pilas de combustible. ❖ En 2019, “Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking” lanzó la hoja de ruta del hidrógeno en Europa, que proponía un plan para el desarrollo del hidrógeno hacia 2030 y 2050. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ El hidrógeno se estableció como "energía nacional" de Japón. ❖ En 2014, Japón lanzó el cuarto Plan de Energía Estratégico y publicó una hoja de ruta del hidrógeno y de las pilas de combustible. En el que mostraba una aproximación de lo que sería la producción, el transporte y el almacenamiento del hidrógeno.
Producción y distribución de hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> ❖ En 2019 el Departamento de Energía (DOE) lanzó una oportunidad de financiación de hasta 31 millones de dólares. Para avanzar en la producción, almacenamiento y llenado del hidrógeno. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Tiene una barrera política debido a la consideración del hidrógeno como material peligroso. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Avance en la producción de hidrógeno limpio. ❖ Cambio en la producción de 1/3 del hidrógeno total en hidrógeno limpio para 2030. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Construcción de un sistema eficiente de distribución de hidrógeno para zonas domésticas. ❖ Para 2040, fabricar, transportar y almacenar únicamente hidrógeno limpio.
Infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> ❖ DOE lanzó una asociación con productores de vehículos eléctricos basados en pilas de combustible para avanzar con la infraestructura del 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Procedimientos para aprobar estaciones de hidrógeno no están claros a día de hoy. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ En 2009, Alemania estableció “H2 Mobility” donde invertía en la primera red de hidrogeneras a nivel mundial. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Entre 2016 y 2018, el Ministerio de Economía, Comercio e Industria ha invertido 88 millones de

	<ul style="list-style-type: none"> ❖ hidrógeno. ❖ “California Fuel Cell Partnership” tiene como objetivo 1000 hidrogeneras para 2030. 		<ul style="list-style-type: none"> ❖ En la hoja de ruta de hidrógeno europea se estima la instalación de 3700 hidrogeneras para 2030. 	<p>dólares en investigación y desarrollo y 539 millones de dólares en la construcción de hidrogeneras.</p>
Vehículos comerciales y de pasajeros	<ul style="list-style-type: none"> ❖ El gobierno estadounidense aclaró el papel fundamental del hidrógeno en el transporte en el “Energy Strategy” en 2014 ❖ “California Fuel Cell Partnership” marcó el objetivo de conseguir un millón de vehículos propulsados con pilas de combustible para 2030. ❖ En 2018, el proyecto “shore to shore” que desarrollaba camiones de transporte fue premiado con 41 millones de dólares. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Existencia de subvenciones para vehículos de pilas de combustible que durarán hasta 2025. ❖ El gobierno se centra en aplicaciones comerciales de los vehículos de pilas de combustible al igual que con los vehículos eléctricos. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Según la hoja de ruta se estiman 3,7 millones de vehículos particulares propulsados con pilas de combustible para 2030. ❖ Al igual que se estiman 500.000 vehículos comerciales ligeros y 45.000 camiones y autobuses para ese mismo año. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Los vehículos son en su mayoría de particulares. Lanzaron el Toyota Mirai en 2014. ❖ Tienen como objetivo la fabricación de 800.000 vehículos de pilas de combustible para 2030. ❖ También planean tener 1.200 autobuses y 10.000 montacargas con esta tecnología para 2030.

2 SISTEMAS DE PROPULSIÓN DE VEHÍCULOS CON PILAS DE COMBUSTIBLE

2.1 Sistemas de propulsión.

El sistema de propulsión de un vehículo está compuesto por todos los componentes que generan la energía necesaria para el movimiento del vehículo y la transfieren a la carretera. Todos estos componentes tienen que conectarse de manera segura para garantizar el funcionamiento eficiente del vehículo.

En los vehículos basados en pilas de combustible la tecnología está ligada a un motor eléctrico, de esta forma se eliminan varios componentes propios de los motores de combustión y de sus subsistemas adicionales. Como pueden ser las correas de distribución, válvulas, pistones, cigüeñales, tubos de escape, caja de cambios o sistemas de lubricación. De esta manera se simplifica el diseño, disminuye el coste del mantenimiento y mejora la durabilidad del vehículo [28].

Para calcular la potencia eléctrica requerida por el motor es necesario considerar la resistencia aerodinámica del vehículo, la fuerza de rozamiento de las ruedas y efectos adversos como las pendientes a superar. Estas fuerzas deben ser superadas por el par aplicado a las ruedas.

La fuente de energía más importante que alimenta los vehículos con pilas de combustible es el hidrógeno, que se encuentra almacenado en un depósito a alta presión. Este hidrógeno se convierte en electricidad dentro de la pila de combustible mediante una reacción electroquímica en la que el combustible, en este caso el hidrógeno, se transforma directamente en energía eléctrica sin necesidad de combustión y sus respectivas pérdidas termodinámicas. Esta electricidad generada es convertida en movimiento gracias al motor eléctrico, el cual a través de un diferencial transfiere el par a las ruedas. En caso de necesitar más potencia que la generada por la pila de combustible se recurre a una batería de apoyo, la cual se recarga gracias a que el motor cuenta con frenada regenerativa, es decir, absorbe energía mecánica y la transforma en eléctrica para almacenarla en la batería y usarla posteriormente si fuese necesario. El encargado de optimizar la energía aportada al motor es el sistema de control, que interviene en la carga y descarga de la batería en condiciones de funcionamiento y en la gestión del paso de electricidad desde la pila de combustible. Todos los componentes nombrados, excepto el depósito, se encuentran representados en el diagrama de flujo siguiente que pertenece a uno de los coches de referencia en este sector, el Toyota Mirai [29]:

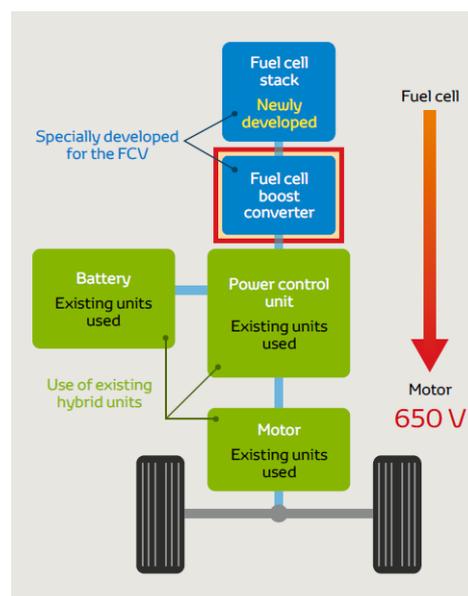


Ilustración 11: Diagrama de flujo Toyota Mirai [8].

Los vehículos que se propulsan mediante pilas de combustible tienen una serie de características muy distintivas que los diferencian del resto de vehículos. La autonomía generalmente es mayor que la de un eléctrico convencional, aunque está limitado en el número de hidrogenas que limita los puntos de carga del depósito de hidrógeno. La temperatura de operación se encuentra en torno a los 80°C, temperatura que se alcanza rápidamente. La eficiencia energética se encuentra por encima del 60%, valor superior al de los motores de combustión interna pero aún inferiores a los vehículos puramente eléctricos [28].

Seguidamente, se analiza en detalle cada uno de los componentes del sistema de propulsión de un vehículo basado en la pila de combustible. En este caso se utiliza como ejemplo un referente y pionero actual en el mundo de los coches de hidrógeno, el Toyota Mirai. En las ilustraciones 12 y 13 (ver a continuación), se muestra la distribución de todos los componentes dentro del vehículo desde una vista frontal hasta una vista lateral.

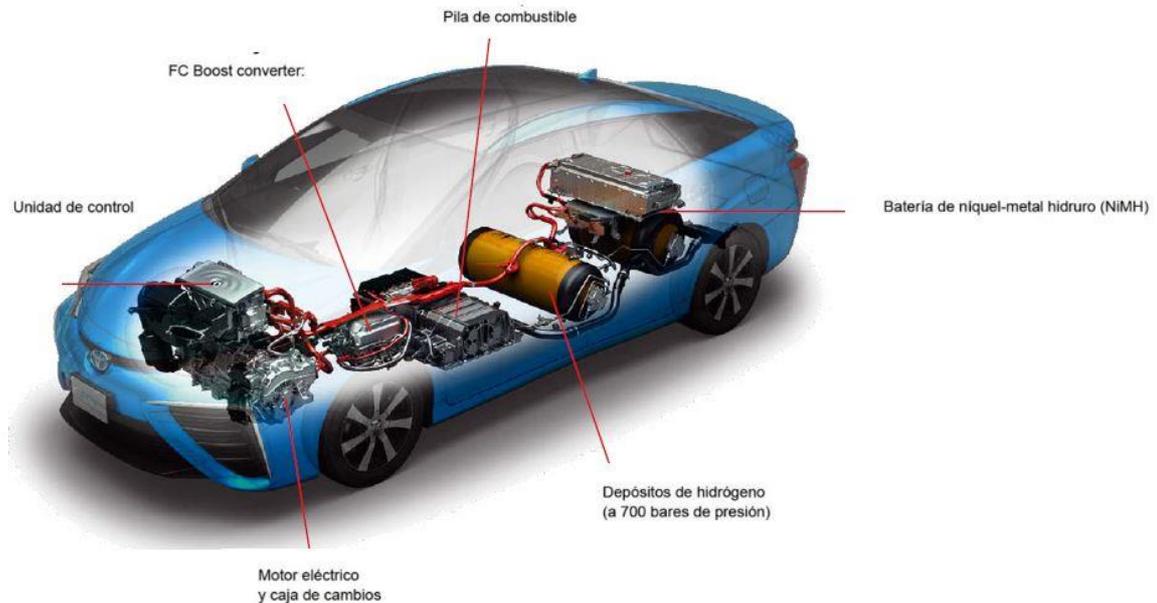


Ilustración 12: Imagen real (frontal) componentes Toyota Mirai [8].

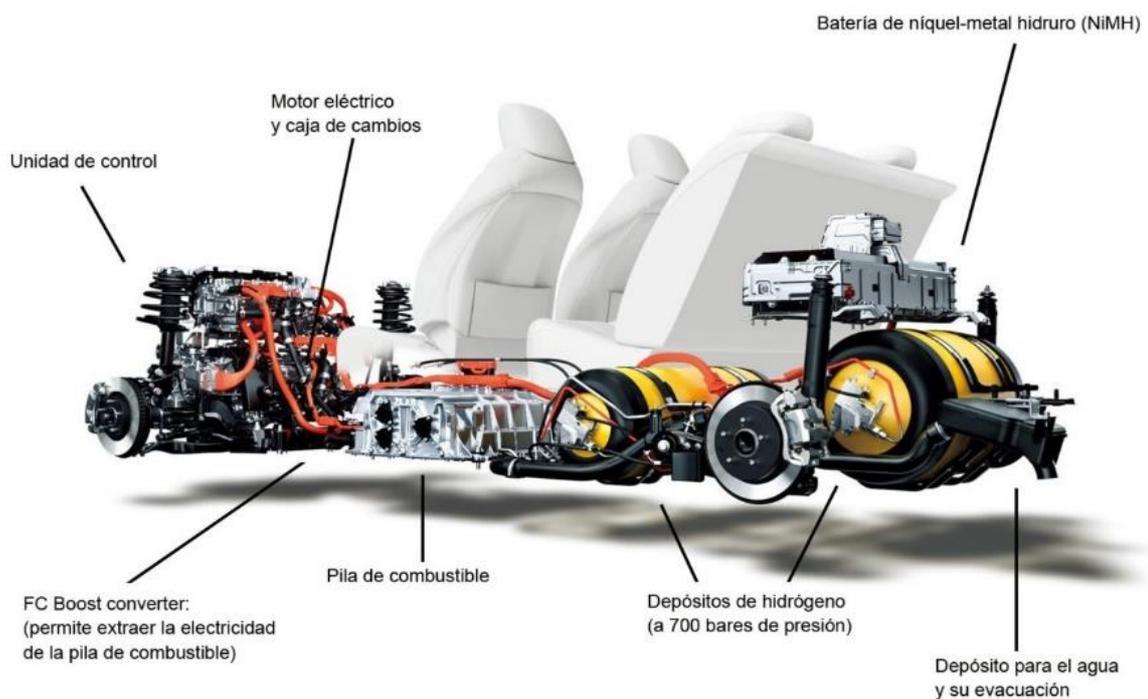


Ilustración 13: Imagen real componentes FCEV Toyota Mirai [30].

En la parte delantera del vehículo se encuentra la unidad de control, mecanismo que se utiliza para controlar la potencia que llega al motor y emplear la batería si fuese necesario. Justo debajo se encuentra el motor eléctrico, es el encargado del movimiento del vehículo, funciona con la electricidad generada por la pila de combustible con el apoyo de la batería. En el caso del Toyota Mirai actualmente da una potencia máxima de 182 CV y un par máximo de 300 Nm lo que consigue lograr una aceleración 0-100 km/h de 9 segundos y una velocidad máxima de 175 km/h [31].

Continuando hacia la zona central del vehículo se encuentra el “Fuel Cell Boost converter”, se utiliza en los vehículos de pilas de combustible para incrementar el voltaje a la salida de la pila. En el Toyota Mirai incrementa el voltaje hasta 650V, es un objeto compacto y de alta eficiencia cuyo objetivo es reducir el número de celdas en el stack, consiguiendo así un menor tamaño y peso del sistema.

Debajo del asiento del conductor se encuentra la pila de combustible, está situada en ese punto para bajar el centro de gravedad del vehículo y de esa manera conseguir mayor estabilidad y una experiencia de conducción más confortable. La pila de combustible que se emplea en los vehículos de hidrógeno es la tipo PEM (Proton Exchange electrolyte Membrane) ya que ofrece una buena relación potencia/volumen, hace poco ruido, es muy eficiente y funciona a una baja temperatura de operación, lo que permite alcanzar rápidamente esta temperatura. La que incorpora el Toyota Mirai tiene una densidad de potencia de 3,1 kW/L [28], [32],[8].

Avanzando hacia la parte trasera, aproximadamente debajo de los asientos traseros, se encuentran los depósitos de hidrógeno a alta presión. Estos depósitos son los encargados de abastecer el hidrógeno necesario a la pila de combustible para que genere electricidad. En el Toyota trabajan a una presión nominal de 70 MPa, con una densidad de almacenamiento de 5,7% del peso y en los que caben alrededor de 5kg. Estos depósitos se recargan en las hidrogeneras en un tiempo aproximado de 3 minutos; a día de hoy se estima una autonomía aproximada de 650 kilómetros.

Por último, junto al maletero, se halla la batería que será la encargada de almacenar la energía procedente de la frenada regenerativa. Sirve para apoyar a la pila de combustible durante aceleraciones en las que la potencia pico del motor sea superior a la generada por la pila y necesite de ayuda extra. En el Toyota Mirai se trata de una batería de ion-litio de alto voltaje, que cambia con respecto a la de hidruro de níquel del anterior modelo; es más pequeña, pero tiene más densidad energética, tiene un voltaje nominal de 310,8V y una capacidad de 6,5 Ah [8] [33].

Otro de los automóviles que emplea como medio de propulsión la pila de combustible y está disponible comercialmente en la actualidad es el Hyundai Nexo, que parte de un precio de salida de 72.850€ (2021). Este coche tiene unas características relativamente similares a las del Toyota Mirai, entre las que destacan las siguientes:

NEXO	
Potencia Pila	95 kW
Potencia Motor	120 kW
Capacidad Batería	1,54 kWh
V. Máx.	179 km/h
0 → 100 km/h	9,7 s
Tanques H ₂ Capacidad	3 / 700 bar 6,33 kg
Tiempo carga	~ 5 min
Autonomía	666 km (822 km urbano)

Ilustración 14: Especificaciones técnicas Hyundai Nexo [34].

La principal diferencia entre ambos vehículos es el tipo de carrocería, en el caso del Hyundai Nexo se trata de una carrocería tipo SUV, muy demandada en el mercado europeo actualmente cuyo coeficiente frontal es $C_x=0,33$. En el caso del Toyota Mirai se trata de una berlina convencional con una suspensión más baja, lo que garantiza menores consumos y mayor comodidad en viajes largos. La distribución de los componentes en este coche se puede apreciar en la siguiente ilustración:



Ilustración 15: Distribución componentes Hyundai Nexo [35].

La distribución también es parecida a la del Toyota Mirai con casi todos los componentes situados en la misma posición, a excepción del stack de la pila de combustible que se sitúa en el mismo lugar donde iría un motor de combustión interna convencional. Tanto el stack como todos los componentes y sistemas auxiliares necesarios para la entrega de energía (Balance of Plant: BoP) tienen un excelente empaquetado y ocupan poco volumen, parecido a la que lo haría un motor diésel junto con su transmisión.

El Hyundai Nexo cuenta con tres tanques de hidrógeno que funcionan a 700 bar con una capacidad de 6,33 kg. de H_2 , dichos tanques tienen una durabilidad de 5.000 cargas o en su defecto, 15 años. Esta durabilidad es uno de los principales centros de atención que se están tratando de mejorar con investigación, como también lo es la seguridad de los tanques. En este sentido, los tanques del Hyundai Nexo cuentan con un sistema de sellado en caso de fuga y con un sistema de ventilación en caso de sobrecalentamiento. El consumo real de este Hyundai Nexo ronda los 1,4 kg H_2 / 100 km, que con los 6,33kg. de H_2 de los tanques nos proporciona una autonomía real de aproximadamente 452 kilómetros.

El sistema de control regula la carga y descarga de la batería de la misma manera que el Toyota Mirai. En caso de emplear la frenada regenerativa transforma esta energía mecánica en eléctrica y lo transfiere a la batería, como se puede observar en la siguiente imagen obtenida directamente del panel de control del Hyundai Nexo:



Ilustración 16: Funcionamiento frenada regenerativa Hyundai Nexo [34].

En el caso de necesitar más energía que la proporcionada por el stack de celdas de combustible, como puede ser el caso de una aceleración brusca o una cuesta empinada, se utiliza la energía acumulada en la batería para apoyar al motor eléctrico como se puede ver en la imagen a continuación:



Ilustración 17: Funcionamiento batería + pila de combustible Hyundai Nexa [34].

A día de hoy ambas alternativas no son viables en España; no por los coches en sí, ya que los dos son coches cómodos, avanzados tecnológicamente y que saben aprovechar las cualidades de la pila de combustible, sino por la escasez de hidrogeneras en España. Ámbito en el que se espera una mejora cercana ya pronosticada en la Hoja de Ruta del Hidrógeno, en la cual una de las medidas para 2030 supone la implantación de una red de entre 100 y 150 hidrogeneras en España de acceso al público.

2.2 Pilas de combustible.

La pila de combustible es el componente más relevante de mi proyecto, debido a que es el elemento diferenciador en el caso de vehículos propulsados con pilas de combustible con respecto a otros tipos de vehículos. Por tanto, se le realiza un estudio detallado analizando desde su comienzo histórico hasta los tipos de pilas de combustible y sus usos más comunes.

2.2.1 Introducción a las pilas de combustible.

Una pila de combustible es un reactor electroquímico que transforma la energía química de un combustible y un oxidante directamente en electricidad. Actualmente, las pilas de combustible son casi únicamente utilizadas con hidrógeno como fuente primaria de energía.

Como se ha comentado con anterioridad, el hidrógeno se lleva empleando como combustible para movilidad desde hace 200 años, donde se quemaba en un motor de combustión interna para producir energía. Sin embargo, no tuvo éxito debido a su baja densidad energética y a preocupaciones relacionadas con la seguridad. A día de hoy, el hidrógeno ha vuelto a ocupar un lugar central en la búsqueda de fuentes de energía, pero esta vez en forma de aplicaciones de las pilas de combustible.

Una de las aplicaciones que se está desarrollando se trata de la implementación de pilas de combustible en vehículos y su viabilidad económica. Actualmente, los vehículos propulsados mediante pilas de combustible son un 40% más caros que los vehículos eléctricos y un 90% más caros que vehículos propulsados por motores de combustión interna, aunque se prevé una bajada del Coste Total de Propiedad (TCO: Total Cost of Ownership) en torno al 50% en los próximos 10 años[27].

Esta disminución del TCO en los vehículos propulsados por pilas de combustible viene estimada por una mejora en la economía de escala, una maduración de esta tecnología, un menor coste del hidrógeno como combustible y una mejora general en la infraestructura.

Los costes materiales de un sistema de pila de combustible son relativamente baratos en comparación con los

costes de fabricación, debido al alto requerimiento tecnológico que conlleva. Gracias a esto, se tiene un amplio margen de mejora en relación a los costes, que se pueden disminuir significativamente con mejoras en la economía de escala.

A continuación, se muestra un repaso de la historia y la evolución de las pilas de combustible, que gracias a avances tecnológicos y políticas de gobierno se ha llegado al progreso actual:

- En 1839 fue inventada la primera pila de combustible por William Grove
- En la década de 1960, la NASA empleó una pila de combustible alcalina para generar potencia en el Apolo y en Gemini. En el año 1966 de esta misma década, General Motors desarrolló el primer vehículo que funcionaba con pilas de combustible.
- En la década de 1970, se utilizaban principalmente pilas de combustible de ácido fosfórico para la distribución de potencia generada. Además, fue la crisis global del petróleo que incitó a desarrollar energías alternativas, entre ellas las pilas de combustible.
- En la década de 1990, Ballard desarrolló la pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) que permitía empezar a usar las pilas de combustible en vehículos. En 1993, creó el primer autobús con este tipo de pila. Un año más tarde, Daimler introdujo el NECAR 1, un vehículo más moderno alimentado por ese tipo de pila de combustible.
- En 2002 Toyota tuvo disponible en alquiler su vehículo de pilas de combustible, en Estados Unidos y en Japón.
- En 2003 el Departamento de Energía americano (DOE) patrocinó con 1,2 billones de dólares la iniciativa de la tecnología de pilas de combustible empleada para el transporte. Ese mismo año, 25 países miembros de la Unión Europea lanzaron el proyecto “European Research Area” (“ERA”), que trataba de construir una plataforma específica para la investigación y desarrollo del hidrógeno y las pilas de combustible.
- Desde el año 2011, el gobierno de China emite planes para guiar y fortalecer la investigación y desarrollo del hidrógeno y las pilas de combustible.
- En 2013 muchos fabricantes de automóviles, entre los que se encuentran Ford, Honda y Nissan, crearon una asociación para desarrollar y mejorar la infraestructura y la comercialización de los vehículos propulsados con pilas de combustible.
- En 2014, Toyota lanzó al mercado el primer coche disponible con esta tecnología, el Toyota Mirai. Seguido de Hyundai que sacó el suyo al año siguiente, el Hyundai Nexa. Este mismo año, Japón aprobó el cuarto Plan Estratégico de Energía, que presentaba una hoja de ruta del hidrógeno en la que explicaba su funcionamiento, su producción, almacenamiento, transporte y aplicaciones.
- En 2018 se probaban por primera vez en todo el mundo los trenes alimentados con hidrógeno, fabricados por la empresa francesa Alstom.

Gracias a todas las políticas gubernamentales y al desarrollo tecnológico de las pilas de combustible, están cobrando especial relevancia las aplicaciones que se pueden obtener de las mismas [27].

Resulta de especial interés apreciar el número de vehículos que empleaban las pilas de combustible como medio de propulsión en 2019 y las previsiones de futuro, según el tipo de vehículo y la geografía:

Tabla 2: Comparativa número de FCEVs en 2019 y en el futuro [33].

						
	Passenger vehicles	Buses and coaches	Trucks	Forklifts	Refueling stations	
US	Current	7,271	35 active, 39 in development	prototype test	>30,000	~42 online
	Target		5,300,000 FCEVs on US roads by 2030		300,000 by 2030	7,100 by 2030
China	Current	0	2,000+	1,500+	2	23
	Target	3,000 by 2020 1,000,000 by 2030	11,600 commercial vehicles by 2020 ⁸⁷			100 by 2020 500 by 2030
Europe	Current	~1000+	~76	~100	~300	~152
	Target	3,700,000 by 2030	45,000 fuel cell trucks and buses by 2030			~3,700 by 2030
Japan	Current	3,219	18	N/A	160	127; 10 in progress
	Target	40,000 by 2020	100 by 2020		500 by 2020	160 by 2020
		200,000 by 2025 800,000 by 2030	1,200 by 2030		10,000 by 2030	900 by 2030

2.2.2 ¿Cómo funcionan las pilas de combustible?

El H_2 es un gas que contiene gran cantidad de energía química, si se combustiona con O_2 gaseoso procedente del aire libera energía y el único producto resultante es agua. Esta reacción está representada por la siguiente fórmula: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$. Para aprovechar la energía de esta reacción química se utiliza la pila de combustible; se trata de un mecanismo que toma hidrógeno y oxígeno y los emplea para crear electricidad.

Como se observa en la ilustración 14, primero la molécula de hidrógeno se introduce en uno de los electrodos, llamado ánodo, mientras que el oxígeno se encuentra en el otro electrodo, el cátodo. El hidrógeno tiende a juntarse con el oxígeno para formar agua. Aprovechando esta predisposición, se coloca un catalizador justo después del ánodo cuyo objetivo es separar la molécula neutra de hidrógeno en el protón y el electrón correspondientes. Esta reacción de oxidación corresponde con la fórmula: $H_2 \leftrightarrow 2H^+ + 2e^-$.

Para aprovechar la corriente eléctrica (el flujo de electrones), se bloquea el paso de los electrones con un electrolito, el cual solo permite el paso de iones positivos (H^+). De esta forma se consigue reconducir los electrones empleando un cable que rodea el electrolito, de donde obtendremos la potencia eléctrica de la pila de combustible.

Estos electrones se reúnen con los iones de hidrógeno positivos y con el oxígeno en el cátodo, reaccionando químicamente para formar agua. Esta agua, en forma de vapor, tendrá que ser evacuada de la pila de combustible

rápidamente para mejorar el rendimiento de la pila [27].

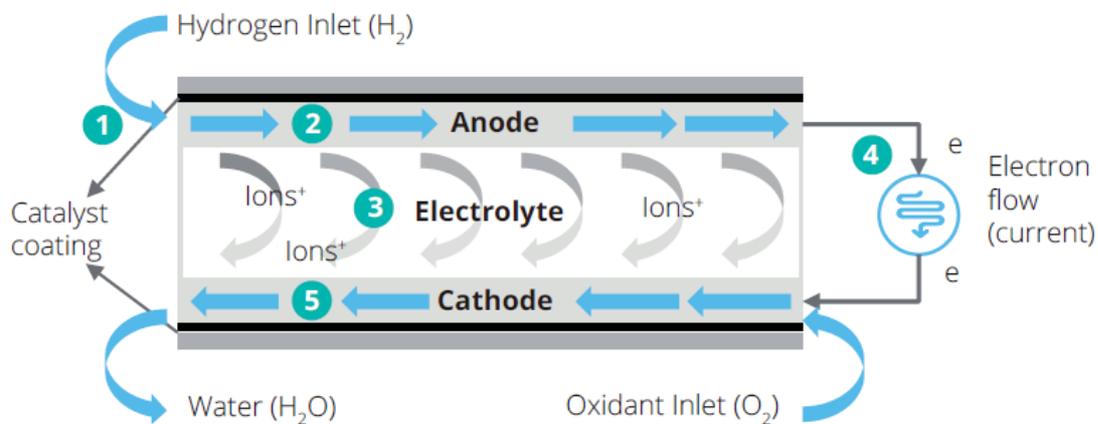


Ilustración 18: Funcionamiento de la pila de combustible [27].

La celda de combustible es el componente principal de un sistema de energía de pilas de combustible (stack). A partir de reacciones electroquímicas que tienen lugar en la celda de combustible, se produce electricidad en forma de corriente continua. Una sola celda de combustible origina menos de 1 V, que es insuficiente para la mayoría de las aplicaciones. Por lo tanto, las celdas de combustible individuales se agrupan típicamente en serie en un stack de pilas de combustible. Un stack de pilas de combustible puede estar formado por cientos de celdas de combustible. La cantidad de energía generada por cada pila de combustible depende de varios factores, como el tipo de celda de combustible, la temperatura de operación, el tamaño y la presión de los gases suministrados a la pila [36].

Un ejemplo de un stack de pilas de combustible del tipo PEM (Polymer Electrolyte Membrane) se muestra en la siguiente ilustración:

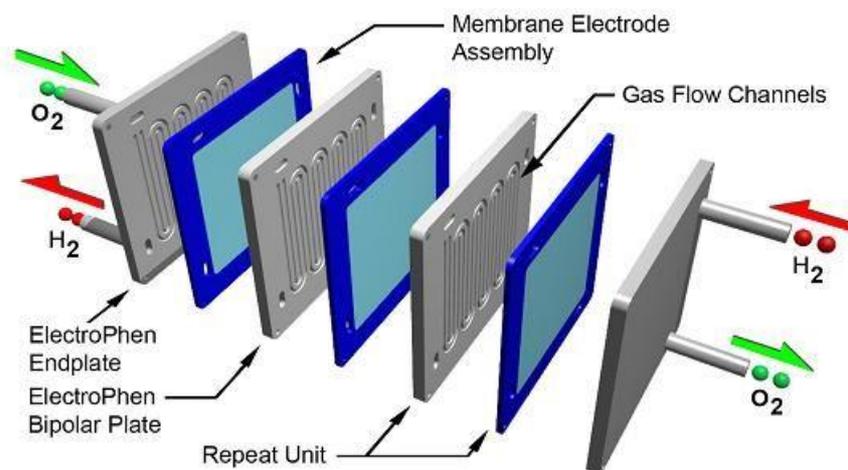


Ilustración 19: PEM fuel cell stack [37].

Este tipo de pilas de combustible tienen un componente clave, las placas bipolares. Estas placas reparten uniformemente el gas combustible (usualmente hidrógeno) y el aire, transportan la corriente eléctrica de una celda a otra, evitan la fuga de gases y refrigerante y disipan el calor del área activa. Las placas bipolares también influyen significativamente en el volumen, peso y costo de las pilas de pilas de combustible PEM [38].

Algunas características generales que destacan de las pilas de combustible son [39]:

- Son versátiles ya que cualquier compuesto capaz de ser oxidado en condiciones de operación podría

emplearse como combustible. Los más utilizados son el hidrógeno, hidrocarburos o alcoholes.

- Son silenciosas lo que permite su instalación en áreas urbanas o mejora el confort en aplicaciones como la automovilística.
- El tamaño se puede ajustar aumentando el número de pilas del stack en función de la potencia requerida.
- Es compatible con el medioambiente si se emplea hidrógeno como combustible, ya que el único residuo producto es el vapor de agua.
- Tienen alta eficiencia, generando únicamente electricidad se encuentra en torno al 50% mientras que si se emplea para cogeneración puede aumentar hasta un 85%.
- Actualmente tienen un coste relativamente elevado, este punto se comenta en detalle en los siguientes apartados del proyecto.

2.2.3 Tipos de pilas de combustible.

Las pilas de combustible se clasifican típicamente por el tipo de electrolito que utilizan. Esta clasificación establece el tipo de reacción electroquímica que tiene lugar, el tipo de catalizador requerido, el rango de temperaturas en el que opera, el combustible necesario y otros factores. Estas características dictaminan las aplicaciones para las que se utilizarán cada tipo de pila de combustible. Actualmente, se están desarrollando varios tipos de pilas de combustible, cada una con sus propias ventajas, debilidades y aplicaciones específicas [40].

A continuación, se muestran dos tablas comparativas entre los tipos de pilas de combustible con sus características diferenciadoras:

Tabla 3: Comparativa tipos de pilas de combustible [41].

Tipos de pilas de combustible	Electrolito	Temperatura de operación	Potencia típica	Eficiencia eléctrica
Membrana de electrolito polimérico (PEM)	Ácidos perfluorosulfónicos	$< 120^{\circ}\text{C}$	$< 1 - 100\text{kW}$	60%
Alcalina (AFC)	KOH	$< 100^{\circ}\text{C}$	$1 - 100\text{kW}$	60%
Ácido fosfórico (PAFC)	H_3PO_4	$150 - 200^{\circ}\text{C}$	$5 - 400\text{kW}$	40%
Carbonato fundido (MCFC)	Carbonatos de sodio, potasio o litio fundido	$600 - 700^{\circ}\text{C}$	$300\text{kW} - 3\text{MW}$	50%
Óxido sólido (SOFC)	Circonia estabilizada con itria	$500 - 1000^{\circ}\text{C}$	$1\text{kW} - 2\text{MW}$	60%

Tabla 4: Comparación aplicaciones, ventajas y debilidades por tipos de pilas de combustible [41].

Tipos de pilas de combustible	Aplicaciones	Ventajas	Debilidades
Membrana de electrolito polimérico (PEM)	<ul style="list-style-type: none"> • Generación auxiliar • Generación portátil • Generación descentralizada • Transporte 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor problema de manejo y corrosión gracias al electrolito sólido. • Bajas temperaturas de uso. • Inicio rápido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Catalizadores caros. • Sensible a las impurezas del combustible.
Alcalina (AFC)	<ul style="list-style-type: none"> • Militar • Espaciales • Generación auxiliar • Transporte 	<ul style="list-style-type: none"> • Amplio rango de materiales estables que permite el uso de componentes más baratos. • Bajas temperaturas de uso. • Inicio rápido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible al CO₂ del aire y en el combustible. • Control del electrolito (acuoso). • Conductividad del electrolito (polimérico).
Ácido fosfórico (PAFC)	<ul style="list-style-type: none"> • Generación descentralizada 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor tolerancia a las impurezas del combustible. • Apropiado para cogeneración. 	<ul style="list-style-type: none"> • Catalizadores caros. • Largo tiempo de arranque. • Sensibilidad al sulfuro.
Carbonato fundido (MCFC)	<ul style="list-style-type: none"> • Utilidad eléctrica • Generación descentralizada 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia. • Flexibilidad de combustible. • Apropiado para cogeneración. • Ciclo de turbina de gas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión y rotura de los componentes a altas temperaturas. • Largo tiempo de arranque. • Baja densidad energética.
Óxido sólido (SOFC)	<ul style="list-style-type: none"> • Generación auxiliar • Utilidad eléctrica • Generación descentralizada 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia. • Flexibilidad de combustible. • Electrolito sólido. • Apropiado para cogeneración. • Ciclo de turbina de gas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión y rotura de los componentes a altas temperaturas. • Largo tiempo de arranque. • Número limitado de cierres.

Las pilas de combustible del tipo PEM presentan una alta densidad energética y, en comparación con otras pilas de combustible, poseen la ventaja de tener bajo peso y volumen. Este tipo de pilas emplean un polímero sólido como electrolito, así como electrodos de carbono poroso que contienen un catalizador de platino. Requieren del oxígeno del aire e hidrógeno para funcionar. Por lo general, este hidrógeno debe ser puro y procede de depósitos a alta presión.

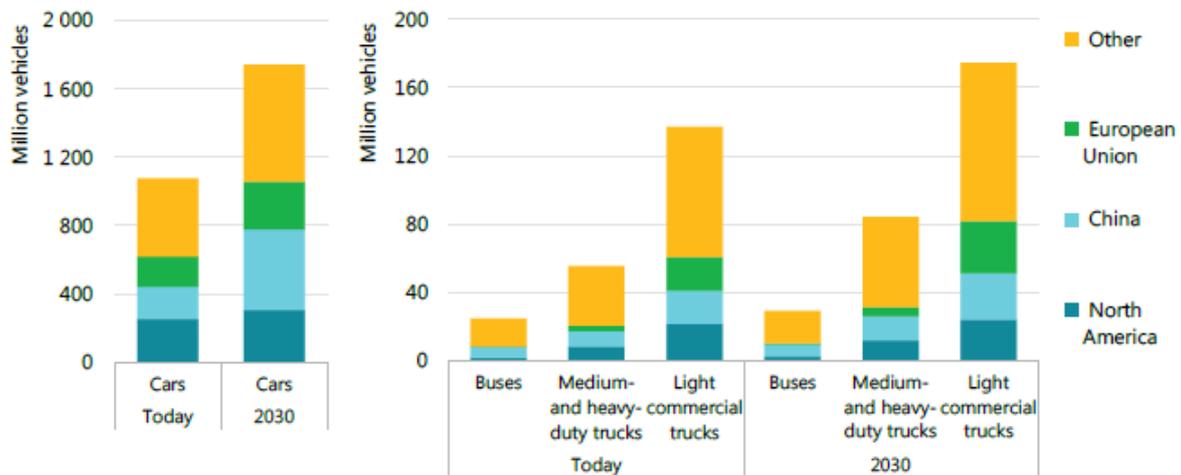
Este tipo de pilas (PEM) operan a temperaturas relativamente bajas, en torno a 80°C. Las bajas temperaturas de operación les permite un inicio considerablemente rápido. Esto se debe a que tardan menos tiempo en calentarse y se traduce en un menor desgaste de los componentes del sistema, lo que resulta en una mayor durabilidad. Sin embargo, necesita del uso de un catalizador de platino para separar los electrones y protones del hidrógeno, lo que aumenta el costo del sistema. Este catalizador de platino tiene otro inconveniente, se trata de su alta sensibilidad al envenenamiento por monóxido de carbono, por lo que es preciso utilizar un reactor adicional para reducir el monóxido de carbono en el gas combustible si el hidrógeno procede de un hidrocarburo.

Las pilas de combustible PEM se usan principalmente en aplicaciones de transporte y en algunas aplicaciones referentes a generadores de energía estacionarios. Actualmente, las pilas PEM son las empleadas en el uso de vehículos de pasajeros, como automóviles y autobuses, gracias a su rápido tiempo de puesta en marcha y su favorable relación de potencia y peso; por ello, cobran especial importancia en mi proyecto, ya que son las utilizadas en los sistemas de propulsión automovilísticos [42].

3 ANÁLISIS ECONÓMICO

Junto con los vehículos eléctricos, los vehículos basados en pilas de combustible son los únicos sin emisiones de escape, por lo que, mediante su uso es posible reducir significativamente la contaminación del aire local, especialmente en las ciudades. Cuando se emplea hidrógeno, cuyo medio de producción es la electrólisis del agua aprovechando la electricidad que proviene de fuentes de energía renovables, se pueden reducir drásticamente las emisiones de dióxido de carbono. La autonomía y el modo de repostaje de los FCEVs es similar al de los vehículos con motor de combustión interna. Por otro lado, en comparación con los biocombustibles, el hidrógeno tiene algunos atributos atractivos como que generalmente no se enfrenta a limitaciones de recursos ni a la competencia por el uso de la tierra. Sin embargo, los FCEVs han retrasado su entrada al mercado debido a los desafíos técnicos y los altos precios de esta tecnología. Actualmente, es necesario seguir mejorando para reducir los costes y construir redes de estaciones de servicio que faciliten el acceso al público a este tipo de vehículos.

Cualquier medio de transporte por carretera puede funcionar técnicamente con hidrógeno, ya sea a través de pilas de combustible o mediante combustibles basados en hidrógeno en motores de combustión interna. Este hecho reafirma el gran potencial que tiene el hidrógeno para un uso futuro en el transporte por carretera. Para realizar una estimación aproximada, si todos los vehículos (automóviles, camiones, autobuses...) que se desplazan por las carreteras fueran remplazados por FCEVs se ampliaría la demanda de hidrógeno a 300 MtH₂/año. La demanda futura teóricamente es incluso más grande, esto se debe al incesante aumento del número de automóviles por habitante y a la demanda de camiones en economías emergentes como se observa en la siguiente imagen:



Source: IEA 2019. All rights reserved.

Ilustración 20: Crecimiento flota de vehículos hasta 2030 [26].

Aunque el potencial teórico es bastante prometedor, como toda tecnología en fase de desarrollo, el despliegue real del uso del hidrógeno como combustible dependerá de cómo evolucionen los hábitos de conducción, del coste del combustible, del coste inicial del vehículo y de las políticas de desarrollo de cada país.

Desde la perspectiva de los consumidores, el coste inicial es solo uno de los muchos criterios de decisión a la hora de comprar un vehículo. Las decisiones de compra también se suelen basar en rendimiento, comodidad, estética, fiabilidad y marca. En este sentido, la adquisición de un vehículo no es una mera cuestión de costes ni de mantenimiento, también se puede tratar de la búsqueda de ciertas características que solo pueden ofrecer los BEVs y los FCEVs. Algunas de ellas como tener cero emisiones, la aceleración inmediata que proporciona un motor eléctrico o un funcionamiento silencioso pueden atraer a cierto sector de consumidores mientras se avanza en la transición al uso de combustibles bajos en carbono.

Que el uso directo del hidrógeno en los FCEVs sea una alternativa competitiva y económica depende de cómo evolucionen los costes de tres componentes esenciales: el coste del stack de la pila de combustible, el coste del almacenamiento a bordo y el coste del repostaje de hidrógeno. Es necesario analizar y desglosar el coste de cada

componente de un FCEV para poder identificar las aplicaciones más prometedoras y reconocer los puntos clave donde se podría reducir el coste total del vehículo.

La pila de combustible ha experimentado reducciones de costes considerables durante la última década, pero los volúmenes de producción son bajos y los costes siguen siendo elevados. El coste comercial actual de una pila de combustible se estima en 230 \$/kW, aunque es probable que mediante avances tecnológicos pronto se reduzca este coste a 180 \$/kW. Estos avances pueden ser, por ejemplo, aumentar la actividad del catalizador para poder reducir el contenido de platino, que es uno de los componentes más caros. También se optimiza el diseño y la integración de los componentes de la pila de combustible en el conjunto de la membrana (MEA); a la vez que se investiga la manera de reducir el coste total del stack (catalizador, membrana, placas bipolares...) y de los componentes del balance de planta [26].

Una manera de reducir el coste en el futuro es mediante economías de escala, es decir, con el aumento del número de unidades producidas en cada planta de fabricación disminuye el coste específico de cada componente. Alrededor de la mitad del coste del sistema está incluido en las placas bipolares, membranas, catalizador y en las capas de difusión de gases. El coste compuesto por estos componentes se reduciría en un 65% aumentando la escala de la planta de fabricación de 1.000 a 100.000 unidades al año, lo que reduciría los costes del sistema a 50 \$/kW[26].

Sin embargo, este tipo de economía tiene que tener un equilibrio entre aumentar el número de unidades y mejorar a su vez el rendimiento y la durabilidad de la pila de combustible. Unos mayores requisitos de durabilidad establecen una limitación en la reducción de costes lograda gracias a la economía de escala. Los datos recientes del Departamento de Energía de EE. UU. (DOE) toman en consideración estas compensaciones y facilitan un coste preliminar ajustado por durabilidad de 75 \$/kW. Aunque los fabricantes de automóviles trabajan en aumentar la durabilidad, por ejemplo, mediante la construcción de mapas de operación para las pilas de combustible con el objetivo de reducir las pérdidas de rendimiento futuras.

En 2017, se vendieron en torno a 1,6 millones de camiones ligeros y 1,8 millones de camiones pesados; estos camiones requieren el doble y el cuádruple de potencia que un automóvil respectivamente. Estos requisitos de potencia se podrían solventar instalando stacks de pilas de combustible modulares, con 2 stacks para el camión ligero y 4 stacks para el pesado. De esta forma, se puede conseguir aumentar la demanda significativamente, obteniendo una rápida economía de escala en el tema de fabricación de stacks. Para alcanzar una participación del 5% del mercado global, se requerirían cinco plantas de producción de pilas de combustible que fabricasen 100.000 stacks cada año[26].

El sector de los automóviles tiene un tamaño de mercado mucho mayor que el de los camiones, con ventas cada año de vehículos nuevos en torno a 85 millones y ventas de camiones comerciales ligeros en torno a 10 millones en 2017. Estos vehículos ligeros necesitan una única pila de pila de combustible para funcionar. Lograr una participación del 5% del mercado mundial de automóviles requeriría 40 plantas de fabricación de pilas de combustible, cada una con una producción media de 100 000 unidades al año.

Otro de los sistemas esenciales que se debe analizar se trata del sistema de almacenamiento dentro del vehículo, que incluye el tanque de almacenamiento, válvulas, reguladores y accesorios. Actualmente, se estima un coste de 23 \$/kWh para el almacenamiento de hidrógeno con una producción de 10.000 unidades al año. Aumentar esta producción a 500.000 unidades al año podría reducir el coste a 14-18 \$/kWh, que se acerca más al objetivo del DOE que se encuentra en 8 \$/kWh. El coste de los tanques de almacenamiento se prevén que disminuyan más lento que el de las pilas de combustible, debido a que estos costes están ligados a los costosos materiales compuestos que forman los tanques. Además, este almacenamiento requiere que se comprima el hidrógeno a 700 bar debido a la baja densidad energética del hidrógeno, esto supone una pérdida energética del orden del 15% de la energía contenida en el hidrógeno[26].

En camiones pesados el coste actual para un tanque de 1.800 kWh, que son 700 kilómetros de rango aproximadamente, está alrededor de 27.000 dólares y se espera una bajada a 16.700 dólares en un futuro. Mientras que, para automóviles con un rango de 600 kilómetros y un tanque de 225 kWh, actualmente cuestan en torno a 3.400 dólares y se espera que baje a largo plazo hasta los 1800 dólares[26].

Cuando se piensa en la viabilidad de los FCEVs en un futuro, siempre se viene a la mente la infraestructura necesaria para su uso, es decir, las hidrogeneras, sus capacidades de repostaje, la red de distribución del hidrógeno y su coste.

A día de hoy existe una tensión entre el coste del hidrógeno, la demanda actual y el tamaño de las hidrogeneras que se oponen al progreso del hidrógeno como combustible para el transporte. En las fases de implementación iniciales cobra más sentido la construcción de pequeñas estaciones de servicio, ya que aseguran una mayor tasa de utilización con la limitación de vehículos que existe actualmente, aunque tienen un mayor coste por unidad de hidrógeno entregada. Las estaciones más grandes pueden ayudar a reducir el coste del hidrógeno al usuario final, ya que tienen mayor rentabilidad. Estas estaciones son más lógicas una vez se hayan establecido unos volúmenes de demanda suficientes. Para fomentar la construcción de estaciones de servicio en las fases iniciales, antes de que los ingresos puedan mantener la inversión, los responsables políticos de muchos países están incentivando este tipo de construcciones con medidas que favorecen a las partes interesadas.

El coste del hidrógeno depende de la localización de su producción, si se ha producido localmente o se entrega desde instalaciones de producción centralizadas. En cada caso puede ser más rentable una u otra dependiendo de si el coste de distribución desde instalaciones centralizadas compensa el menor coste de producción del hidrógeno en las mismas.

Con respecto a los combustibles convencionales, el tiempo de repostaje actualmente es bastante similar, sin embargo, suministrar hidrógeno a las estaciones de servicio suele necesitar más tiempo y mano de obra. Resulta complicado estimar los costes debido a la escasez de hidrogeneras, que son menos de 400 en todo el mundo y también se debe a los pocos datos proporcionados por las mismas. Se pueden estimar los costes de las inversiones futuras en servicios de repostaje de hidrógeno; que para hidrógeno a 700 bar oscilan entre 0,6 y 2 millones de dólares y para hidrógeno a 350 bar entre 0,15 y 1,6 millones de dólares. La capacidad de carga de estas hidrogeneras se mueve entre 50 kg H₂ al día y 1.300 kg de H₂ al día[26].

El coste real de construir una estación de servicio cambia ampliamente entre los distintos países, especialmente como resultado de diferentes requisitos de seguridad y permisos. Los dos componentes que tienen mayor impacto en el coste final son el tanque de almacenamiento, que tiene que ser bastante grande debido a la baja densidad del hidrógeno, y el compresor, que si tiene que lograr una presión de llenado de 700 bar puede llegar a suponer un 60% del coste total. Estos costes también varían considerablemente con la economía de escala; un aumento de la capacidad de una hidrogenera de 50 a 500 kg H₂ al día podría variar el coste del kg de hidrógeno entregado hasta un 75%. Se planifican estaciones de hasta 1.000 kg de H₂ al día para aplicaciones como camiones pesados, que ofrecen un gran potencial de economía de escala.

En comparación con la infraestructura necesaria para los vehículos eléctricos, el coste inicial es mayor para la construcción de hidrogeneras que para puestos de carga eléctricos. A pesar de ello, las hidrogeneras tienen una serie de ventajas significativas como son un reabastecimiento del combustible mucho más rápido y un requisito de espacio en torno a 15 veces menor. Además, si se implementasen a gran escala el coste de inversión final sería potencialmente más bajo. Para que la proporción de estaciones de servicio por coche sea similar a la actual de los automóviles convencionales, se necesitarían 400 hidrogeneras por cada millón de FCEVs de hidrógeno. Mientras que, para un millón de vehículos eléctricos serían necesarias un millón de estaciones de carga privadas y un mínimo de 10.000 estaciones de carga rápida públicas [26].

3.1 Costes de los sistemas de pilas de combustible PEM para automóviles.

Las pilas de combustible del tipo Polymer Electrolyte Membrane (PEM), como se ha comentado anteriormente, es la empleada actualmente en los vehículos propulsados mediante pilas de combustible, por características como la baja temperatura de operación, la rápida adecuación a variaciones de carga y su favorable relación potencia/peso.

La electrificación en el sector de los vehículos ligeros a través de tecnologías como las pilas de combustible tiene un gran potencial para disminuir el uso de petróleo debido al aumento incesante del número de vehículos cada año. Sin embargo, para poder competir con los vehículos con motor de combustión interna es necesaria una reducción de costes del sistema, así como un aumento de la durabilidad. Para 2025, el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) ha establecido el objetivo de coste en 40\$/kW y el de durabilidad en 5000 horas. Mientras que los objetivos finales son 30\$/kW y 8000 horas de durabilidad para poder igualar el coste de los vehículos convencionales [43]. El DOE ha dedicado fondos para identificar y analizar el coste de los sistemas de pilas de combustibles para automoción. Este análisis permite focalizar el I+D de manera más efectiva, en los componentes que supongan el mayor costo del sistema. El diseño del sistema y los modelos de fabricación de

cada componente se renuevan anualmente, de manera que se evalúen el impacto de las nuevas tecnologías y el progreso hacia los objetivos establecidos [44].

A continuación, se va a presentar el resumen de proyección de costes realizado y actualizado en 2018 por Strategic Analysis Inc. para un sistema PEMFC de hidrógeno de 80 kW, que utiliza los componentes adecuados para un automóvil ligero [45]. Este análisis de coste es realizado para tasas de fabricación desde 1.000 sistemas hasta 500.000 sistemas al año. Los resultados del análisis para 100.000 y 500.000 sistemas al año reflejan el beneficio que causaría un alto volumen de producción. El propósito final de este análisis es difundir los puntos clave en relación a los costes dentro del sistema, con el fin de servir como punto de referencia para esta tecnología.

Se emplea una metodología de estimación de costes basada en procesos denominada “Design for Manufacture & Assembly” (DFMA), utilizada para identificar el impacto del coste anual de los avances tecnológicos. Esta metodología es usada por cientos de compañías a nivel mundial.

La configuración del sistema de un automóvil ligero ha sido definida a base de una combinación óptima de componentes a partir de la tecnología actual. El diseño del sistema de 80kW se muestra en la ilustración 21. Existe una tendencia hacia la simplificación del sistema, eliminando sistemas de apoyo parásitos que aumentan el coste final. En el análisis de costes se incluyen todos los componentes principales de un sistema de pilas de combustible, el stack y el balance de planta. Dentro del balance de planta se incluye el circuito de aire, el humidificador, el circuito de recuperación de agua, los circuitos de refrigeración de alta y baja temperatura, el circuito del combustible y el controlador del sistema. Quedan excluidos del análisis de costes el tanque de almacenamiento de hidrógeno, la batería principal del vehículo, el motor eléctrico y el resto de la estructura del vehículo (interior, instrumentación, ventanas...).

A continuación, se muestra el sistema de pila de combustible para un automóvil que incluye todos los elementos descritos previamente, en color rojo se muestran los cambios diferenciadores con respecto al año 2017:

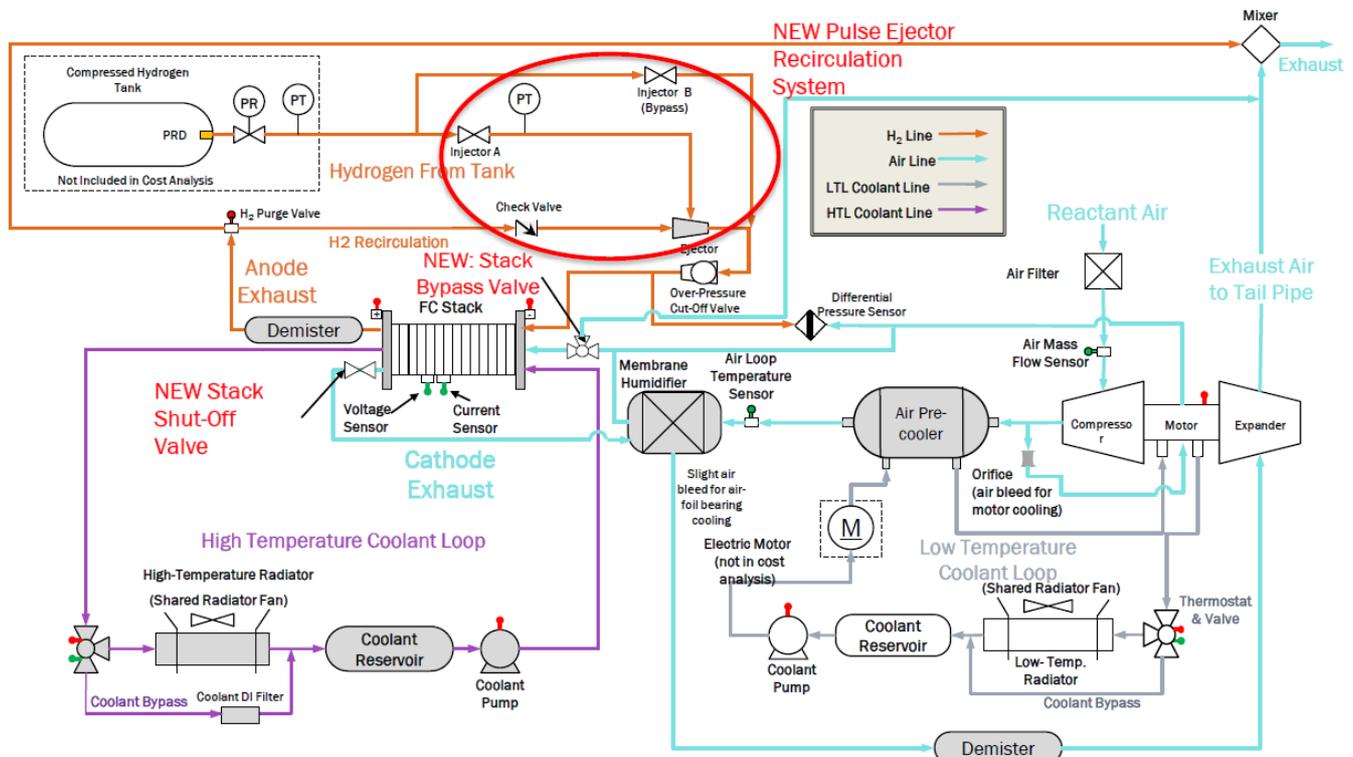


Ilustración 21: Sistema pila de combustible de 80kW [45].

Las condiciones de funcionamiento y las características del sistema se fijan en función de una combinación del modelado, del rendimiento del catalizador y de la información proporcionada por los fabricantes. El voltaje de la celda se establece en función de la optimización de múltiples variables evaluadas en las condiciones de operación del stack para minimizar el coste total del sistema de 80 kW de potencia neta. Se busca un voltaje del sistema de aproximadamente 250V para que sea compatible con el motor eléctrico y está sujeto a una restricción

de rechazo de calor, $Q/\Delta T$, de $\leq 1,45 \text{ kW}/^\circ\text{C}$. La densidad de potencia y el contenido de “platinum group metal” (PGM) están basados en los resultados obtenidos de las pruebas de rendimiento del “membrane electrode assembly” (MEA). Se resumen en la siguiente tabla las características del sistema:

Tabla 5: Características del sistema (2018) [45].

	2018	2020	2025
Densidad de potencia del stack $(\frac{mW}{cm^2_{\text{área activa}}})$	1.165	1.250	1.500
Carga total de platino $(\frac{mgPt}{cm^2_{\text{área total}}})$	0,125	0,125	0,088
Contenido total PGM (g/kW_{brutos})	0,117	0,108	0,064
Potencia neta (kW)	80	80	80
Potencia bruta (añadido el valor estimado de cargas eléctricas parásitas) (kW_{brutos})	87,1	87,1	87,1
Voltaje de cada celda (V)	0,663	0,663	0,663
Presión de operación (atm)	2,5	2,5	2,5
Temperatura del stack ($^\circ\text{C}$)	94	94	94
Estequiometría del aire	1,5	1,5	1,5
Celdas activas	377	377	377
Ratio área activa sobre el total	0,625	0,625	0,65

Los componentes de la pila de combustible, los materiales que los componen y el modo de fabricación se basan en los resultados del análisis de costes del DFMA, ya comentado anteriormente. Se presenta a continuación una tabla con los materiales del sistema y sus especificaciones:

Tabla 6: Materiales del sistema y especificaciones del proceso (2018)[45].

	2018	2020	2025
Material de la membrana	14 μm Nafion, 850EW, reforzada con ePTFE	10 μm Nafion, 850EW, reforzada con “Electrospun PPSU”	Membrana de alto rendimiento, basada en 10 μm Nafion, 720EW, reforzada con “Electrospun PPSU”

Catalizador y aplicación	Revestimiento con matriz ranurada de: -Cátodo: 0,1 mg Pt /cm ² d-PtCo sobre "High Surface Carbon" (HSC) -Ánodo: 0,025 mg Pt /cm ² Pt/C	Revestimiento con matriz ranurada de: -Cátodo: 0,107 mg Pt /cm ² d-PtCo sobre (HSC) -Ánodo: 0,018 mg Pt /cm ² Pt/C	Revestimiento con matriz ranurada de un catalizador de gran rendimiento: -Cátodo: 0,07 mg Pt /cm ² d-PtCo sobre (HSC) -Ánodo: 0,018 mg Pt /cm ² Pt/C
Preparación de la "Catalyst-Coated Membrane" (CCM)	R2R recubierto por inmersión, ePTFE/membrana de ionómero, electrodos revestidos con matriz ranurada, lavado de ácido	Membrana con recubrimiento directo de Gore con electrodos revestidos con matriz ranurada doblemente, lavado de ácido	Membrana con recubrimiento directo de Gore con electrodos revestidos con matriz ranurada doblemente, lavado de ácido
Capas de difusión de gases	105 μm de capa de difusión de gases (GDL) y 45 μm de capa de carbono microporoso (MPL), sin comprimir	105 μm de GDL y 45 μm de MPL, sin comprimir	105 μm de GDL y 45 μm de MPL, sin comprimir
Durabilidad del catalizador	50% Basado únicamente en el catalizador sin tener en cuenta la degradación en la membrana	40% Basado en lograr los objetivos del DOE para 2020	<40% Superando los objetivos del DOE para 2020
Contenido MEA	R2R sub-juntas, prensado caliente para la CCM	R2R sub-juntas, prensado caliente para la CCM	R2R sub-juntas, prensado caliente para la CCM
Placas bipolares y revestimiento	316SS con la capa de transporte físico del vapor modelado como "Treadstone Dots"	304SS con la capa de transporte físico del vapor modelado como "Treadstone TIOX"	304SS con la capa de transporte físico del vapor modelado como "Treadstone TIOX"
Formación/unión de placas bipolares	Estampado progresivo/soldado por láser	Hidroconformado/soldado o por láser	Hidroconformado/soldado o por láser
Juntas de unión del MEA y las placas bipolares	Junta de elastómero de poliolefina serigrafiada sobre las placas bipolares	Junta de elastómero de poliolefina serigrafiada sobre las placas bipolares	Junta de elastómero de poliolefina serigrafiada sobre las placas bipolares
Compresión del aire y eficiencias	Compresor centrífugo, expansor de flujo radial a la entrada. -Compresor: 71%	Compresor centrífugo, expansor de flujo radial a la entrada. -Compresor: 71%	Compresor centrífugo, expansor de flujo radial a la entrada. -Compresor: 71%

	-Expansor: 73%	-Expansor: 73%	-Expansor: 73%
	-Motor/controlador: 90%	-Motor/controlador: 90%	-Motor/controlador: 90%
Sistema de enfriamiento y radiador	Radiador de aluminio, refrigerante agua o propilenglicol, con filtro y preenfriamiento de aire	Radiador de aluminio, refrigerante agua o propilenglicol, con filtro y preenfriamiento de aire	Radiador de aluminio, refrigerante agua o propilenglicol, con filtro y preenfriamiento de aire
Humidificador de aire	“Plate Frame Membrane Humidifier”	“Plate Frame Membrane Humidifier”	“Plate Frame Membrane Humidifier”
Humidificador de hidrógeno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Recirculación del ánodo	Eyector de pulsos (2 eyectores de geometría fija)	Eyector de pulsos con bypass	Eyector de pulsos con bypass
Recuperación del agua de salida	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Juntas del refrigerante y de las placas terminales	Soldado por láser (refrigerante)/Junta de elastómero de poliolefina serigrafiada (terminales)	Soldado por láser (refrigerante)/Junta de elastómero de poliolefina serigrafiada (terminales)	Soldado por láser (refrigerante)/Junta de elastómero de poliolefina serigrafiada (terminales)
Ensamblaje de la celda	Montaje robotizado de las placas bipolares soldadas y de las juntas secundarias del MEA	Montaje robotizado de las placas bipolares soldadas y de las juntas secundarias del MEA	Montaje robotizado de las placas bipolares soldadas y de las juntas secundarias del MEA
Protección contra heladas	Drenaje del agua al apagar	Drenaje del agua al apagar	Drenaje del agua al apagar
Sensores de hidrógeno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Placa terminal/ sistema de compresión	Placas terminales de material compuesto moldeado con bandas de compresión	Placas terminales de material compuesto moldeado con bandas de compresión	Placas terminales de material compuesto moldeado con bandas de compresión
Acondicionamiento de la pila	2	2	1

Se puede visualizar de una manera más clara el proceso de fabricación de un sistema de pilas de combustible de tipo PEM en el siguiente esquema (ilustración 22), obtenido para una aplicación de energía auxiliar de 5kW y 10kW[46].

La pila consta de las placas terminales, las placas bipolares, las juntas de sellado y las MEAs como se muestra en el esquema a continuación, que muestra el proceso de fabricación en formato de diagrama de flujo. Los cuatro procesos de fabricación que llevan al ensamblaje de cada stack son:

- Fabricación de las placas terminales, es decir, las que se sitúan en el extremo del stack: las placas terminales (End Plates) son creadas a partir de una fundición a presión de una aleación de aluminio (A356), que se somete a un proceso de fresado del material y, posteriormente, se emplean técnicas de taladrado, avellanado y roscado de la superficie interna de la pieza.
- Fabricación de las placas bipolares: se emplea el compuesto de moldeo de grafito a granel (BMC940), se le da una forma inicial, y se somete a un moldeo por compresión para después ser recalentado en el horno durante 15 minutos a una temperatura de 175°C.
- Fabricación de las juntas de sellado: se realiza un moldeo por inyección de caucho de silicona líquida para producir las juntas de sellado, que son piezas flexibles y duraderas.
- Fabricación del “membrane electrode assembly” (MEA): se emplean los materiales mostrados en el diagrama, que a través de un molino de bolas se mezclan y moldean durante 10 horas. Se obtienen la capa del cátodo y del ánodo y se introducen en el molde por transferencia. Las capas de difusión de gases se introducen mediante un prensado en caliente y, finalmente, se realiza un proceso de troquelado.

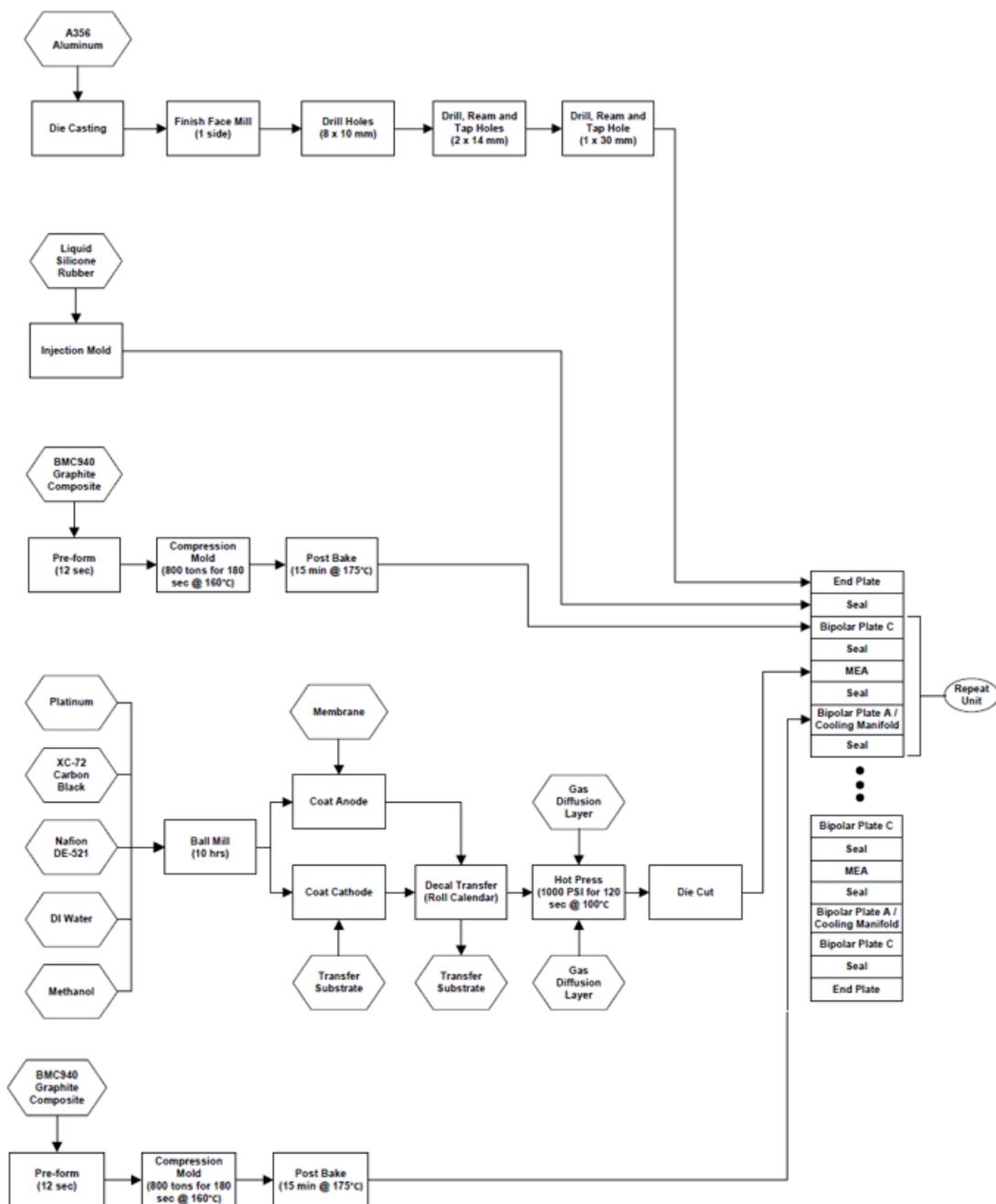


Ilustración 22: Proceso de fabricación del PEMFC stack[46].

3.1.1 Avances tecnológicos.

“Argonne National Lab” (ANL) ha optimizado el rendimiento del modelo con d-PtCo, incrementando la densidad de potencia gracias a un mejorado soporte del HSC. Se estima un incremento de en torno al 6% de esta densidad de 2017 a 2018, pasa de 1,095 mW/cm² a 1,165 mW/cm². En 2016 se utilizaba una aleación que contenía níquel, al pasar al cobalto se consiguió una reducción de en torno a 0,13\$/kW debido a los diferentes procesos de síntesis. Se muestra a continuación una tabla comparativa de los costes estimados de la síntesis del catalizador en 2018 y en 2017, teniendo en cuenta el ratio de producción anual:

PtCo/C Cathode Catalyst Powder Synthesis	Annual System Production Rate					
	1.000	10.000	20.000	50.000	100.000	500.000
Component Costs per 80kWnet Fuel Cell System						

d-PtCo/HSC 2018 Cost Estimate:

Total Catalyst Synthesis Cost	\$/system	1,166.52	\$837.68	\$677.22	\$553.98	\$516.05	\$481.55
-------------------------------	-----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

d-PtNi/C 2017 Cost Estimate:

Total Catalyst Synthesis Cost	\$/system	\$1,108.91	\$756.55	\$628.37	\$540.10	\$518.02	\$492.28
-------------------------------	-----------	------------	----------	----------	----------	----------	----------

Ilustración 23: Comparación costes estimados de la síntesis del catalizador entre 2017 y 2018[45].

Para el mismo rendimiento electroquímico, la deposición física de vapor (PVD) sobre el carbón es probablemente una opción más barata para la fabricación de catalizadores basados en platino. En la siguiente gráfica se muestra la comparación con unos datos de referencia del coste de la fabricación de un catalizador:

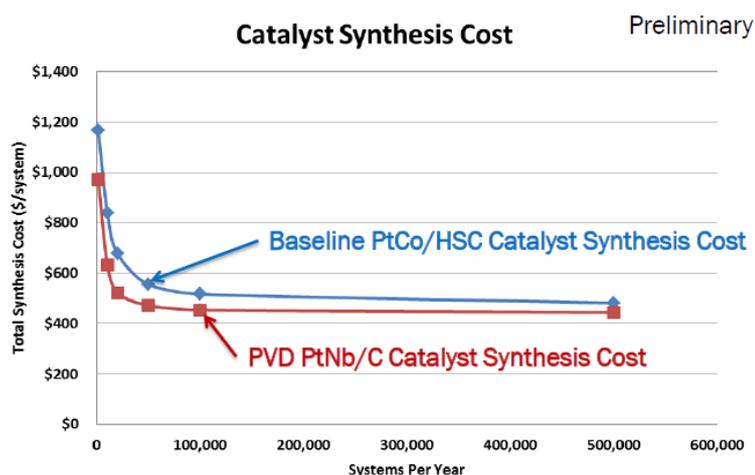


Ilustración 24: Comparación preliminar del coste estimado de fabricación de un catalizador de referencia con uno que emplea PVD [45].

En 2018, se lleva a cabo el análisis de coste de tipo DFMA del “high surface area carbon” (HSC), el cuál estima que para un volumen de producción de 500.000 vehículos al año el precio estimado es 116 \$/kg.

En 2018 se realizaron investigaciones de materiales electrohilados como componentes para pilas de combustible:

- Material de refuerzo de la membrana (“Membrane Support Material”).

Se modela como sustituto al politetrafluoroetileno (ePTFE), con un precio inferior a $2 \$/m^2$ en comparación a los $6 \$/m^2$ de los ePTFE. Con el mismo rendimiento, se obtiene una reducción de $0,6\$/kW$. Se puede observar en la siguiente gráfica la evolución del coste de este material en función de la producción anual:

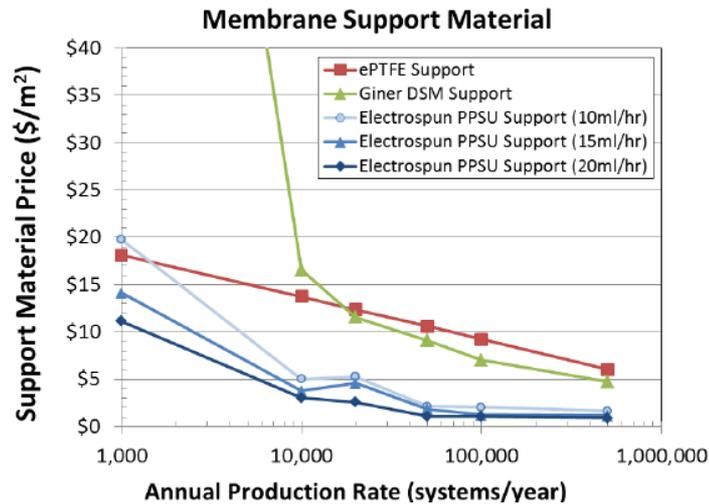


Ilustración 25: Gráfica comparativa del coste del material de refuerzo de la membrana[45].

- Complete Membrane Dual-Fiber (co-spun) Support & Ionomer Material.

La proyección de la membrana electrohilada tiende a ser más barata que la membrana sustentada por ePTFE, como se puede apreciar en la siguiente gráfica:

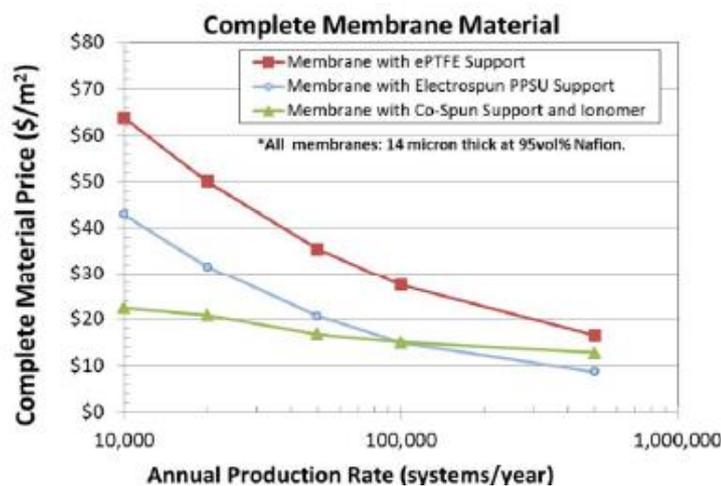


Ilustración 26: Gráfica comparativa del coste del material de la membrana[45].

- Material y revestimiento del cátodo.

A continuación, se muestra un gráfico que estima el coste de los materiales y revestimientos del cátodo, en función del ratio de producción anual.

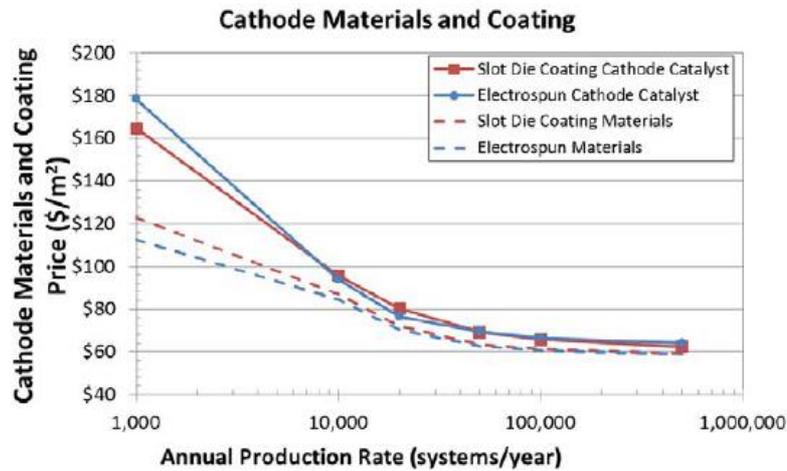


Ilustración 27: Gráfica de estimación de costes de los materiales y revestimiento del cátodo[45].

- Comparación de diferentes MEAs.

En relación al ensamblaje del electrolito, se observa en la siguiente gráfica que para altos volúmenes de fabricación los precios son prácticamente iguales. La nomenclatura de la gráfica significa ES: electrospun material (material electrohilado) y SD: slot die coating (revestimiento con matriz ranurada).

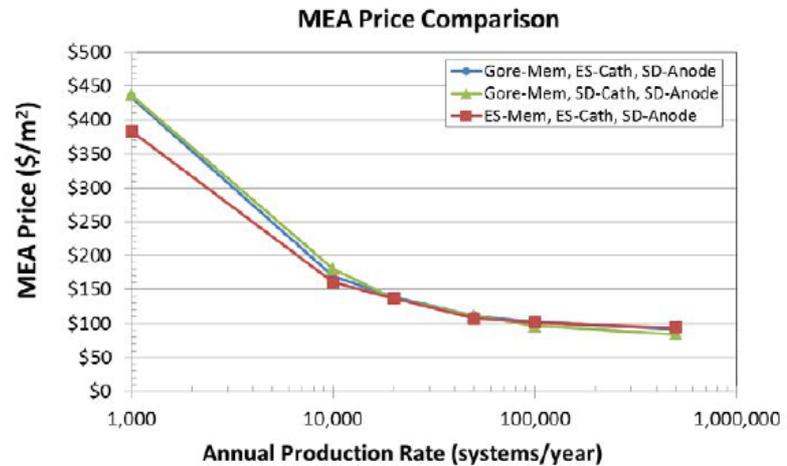


Ilustración 28: Gráfica de estimación costes del ensamblaje del electrolito[45].

3.1.2 Estimación del coste total del sistema.

Como era de esperar, se observa en la ilustración 29 que existe una relación inversamente exponencial entre el coste total del sistema y la tasa de producción anual. Esto se debe a la reducción de precio del material para un volumen mayor de sistemas y un mejor aprovechamiento de las cadenas de fabricación, que con un mayor número de sistemas al año aumentan su tasa de utilización. El rango de producción va ligado a la demanda a corto plazo que esté previsto que sea necesario cubrir, un aumento del volumen de producción hasta que los componentes estén completamente escalado supondría un beneficio mayor debido a la fabricación en masa.

A partir de los 50.000 sistemas al año, la curva de coste del sistema se vuelve prácticamente plana, lo que refleja que los stacks comprenden muchas unidades que se repiten y consiguen mayor utilización de los equipos con menores producciones que los vehículos de combustión interna. Se debe tener en cuenta que muchos de los componentes del balance de planta ya se producen a gran escala, mientras que los componentes del stack necesitan el desarrollo de procesos de fabricación especializados [44].

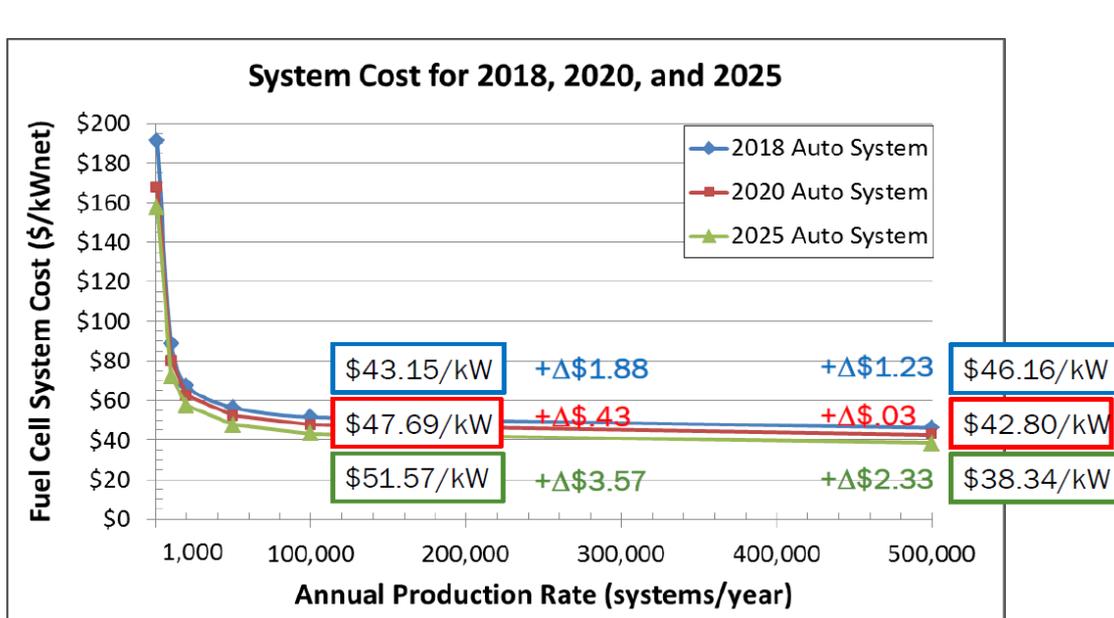


Ilustración 29: Estimación de coste del sistema actual y futuro según la tasa de producción anual [45].

Con respecto a la ilustración 30, mostrada a continuación, se actualizan los datos de costes del sistema de 2017 a 2018 y se comparan con los objetivos del DOE. En primer lugar, sorprende el aumento del coste de un año al siguiente ya que la previsión más cercana según el DOE es conseguir un coste de 40 \$/kW. Para lograr este objetivo, en 2017 se planteaba una reducción del precio de la unidad de aire CEM (Compresor/Expansor/Motor), que pertenece al circuito de aire del balance de planta y supone el mayor porcentaje del coste total dentro del mismo, como se analiza detalladamente más adelante. Por el contrario, los resultados obtenidos en 2018 han supuesto un aumento de 0,61 \$/kW del sistema debido al ajuste por inflación y a un aumento de la eficiencia del 80% al 90%.

También se estimaba una reducción del coste de las placas bipolares de 2 \$/kW de 2017 a 2025, mientras que los resultados finales muestran un aumento del coste de 2017 a 2018 de 0,52 \$/kW. Esto se debe a un análisis más exhaustivo que muestra costes más realistas de las placas, además de un coste añadido de accesorios para la soldadura.

Se han añadido componentes al balance de planta que han incrementado el coste en 0,37 \$/kW. Componentes como una válvula de corte, una válvula de bypass y un inyector han sido añadidos para mejorar la recirculación a baja potencia. Estos componentes se pueden observar en la ilustración 21 rodeados con un círculo rojo.

Gracias a la optimización de las condiciones de operación del catalizador se ha conseguido un aumento de la densidad de potencia, lo que se traduce en una reducción de 0,8 \$/kW con respecto a 2017.

Finalmente, recopilando todos los cambios nombrados se estima el coste del sistema en 46,16 \$/kW (2018), teniendo muy presente que se han estimado para un volumen de producción de 500.000 sistemas al año, dato que está muy lejos de la realidad actual y para un sistema de pilas de combustible de un automóvil de 80kW [45].

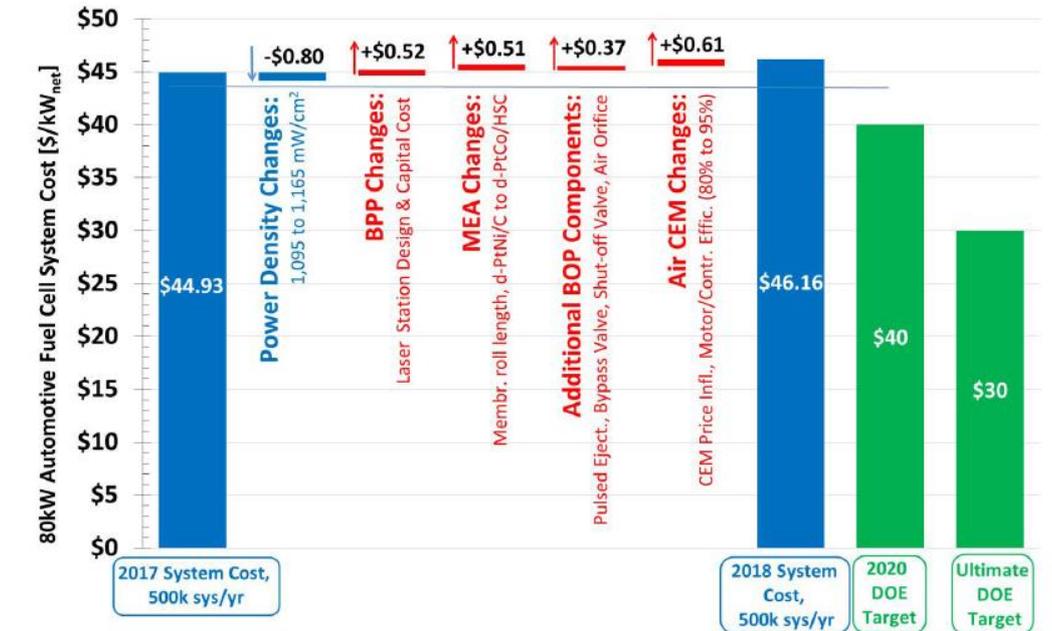


Ilustración 30: Estimación de costes del sistema de pila de combustible para una producción de 500.000 sistemas al año [45].

El objetivo final del DOE con respecto a la durabilidad son 8.000 horas; actualmente la máxima vida útil de un FCEV está por encima de las 4.100 horas[47]. Para un volumen de producción de 100.000 sistemas al año, el coste estimado para 2020 de un sistema de pilas de combustible PEM de 80kW, teniendo en cuenta los objetivos de durabilidad, es 76 \$/kW. Este coste estimado representa un sistema capaz de conseguir las 8.000 horas de funcionamiento reales en carretera, cuya vida útil se consigue gracias a una combinación del diseño de los componentes, de la metodología de operación y del sobredimensionamiento de la pila. Esta mejora en la durabilidad implica un aumento de hasta el 65% del coste del sistema (\$/kW) con respecto al valor establecido en 2018 de 46,16 \$/kW, el cual no tiene en cuenta el ajuste por durabilidad [48].

Los catalizadores de platino, principalmente el del cátodo, constituyen en torno al 40% del coste del stack completo como se muestra en la ilustración 31. Los materiales necesarios para el stack suponen uno de los principales costes del mismo. Materiales como el acero inoxidable, el revestimiento de las placas bipolares, el nafion para las capas de la membrana y el catalizador, suponen un impacto significativo en el coste total del stack. Reducir el contenido de platino y encontrar alternativas a estos materiales que disminuyan el coste del stack son prioridades para poder hacer que los FCEVs sean viables económicamente[44].

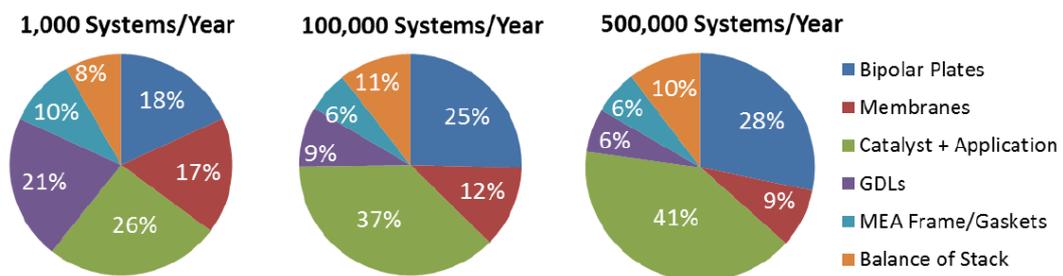


Ilustración 31: Desglose del coste por componente del stack de la pila de combustible [49].

Como se observa en el desglose del sistema total de un vehículo ligero basado en pila de combustible (ilustración 32), el stack de la pila de combustible representa el 45% del coste total del sistema. Las mayores contribuciones a este coste son las placas bipolares y las MEAs, que incluyen la membrana, el catalizador, las capas de difusión de los gases (GDL) y el ensamblaje del conjunto.

Dentro del balance de planta (BOP), cuyo coste supone el 55% del coste total restante, el subsistema más relevante referente al coste es el circuito de aire, seguido por los circuitos de refrigerante y combustible. Dentro del circuito de aire la unidad Compresor/Expansor/Motor (CEM) es el aporte más caro necesario, por tanto, disminuir el coste de esta unidad se establece como objetivo prioritario para lograr los objetivos finales de reducción de costes del sistema.

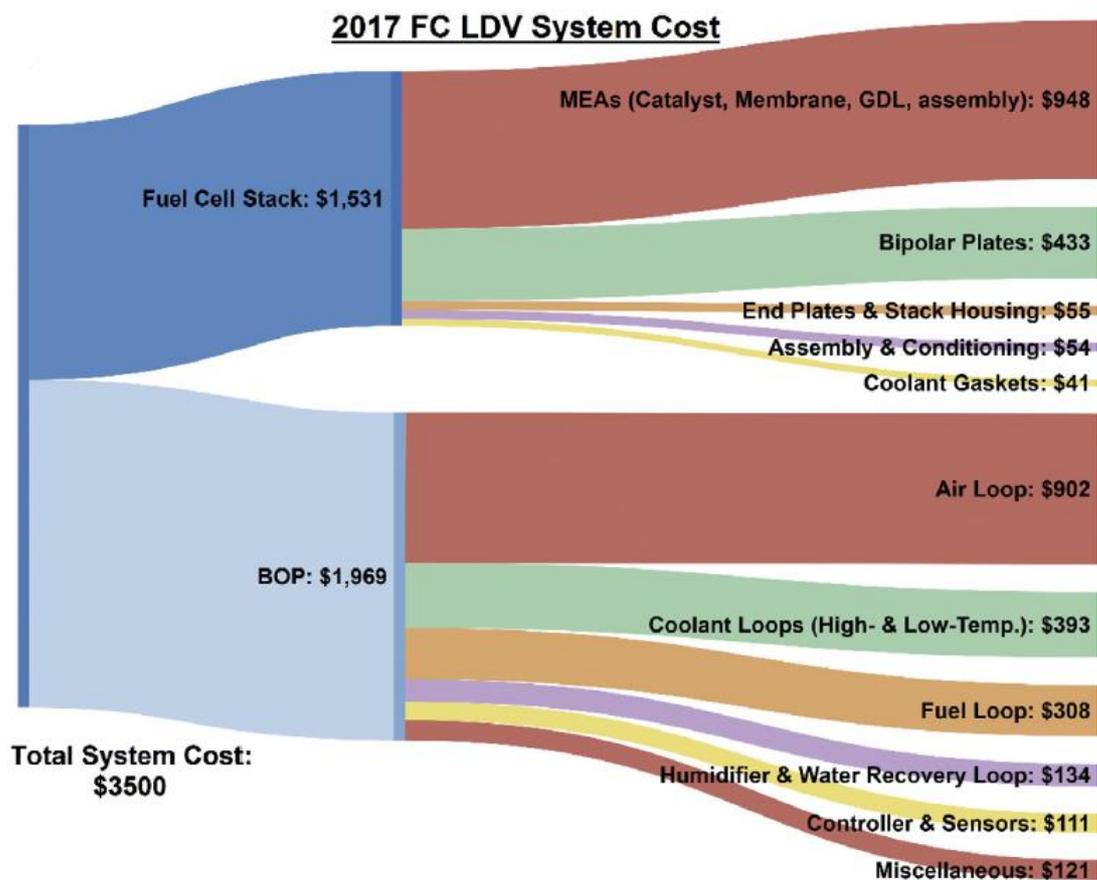


Ilustración 32: Desglose de cada componente del sistema para un volumen de producción de 500.000 unidades al año (2017) [44].

En conclusión, referente al análisis realizado para un sistema de automoción basado en pilas de combustible tipo PEM de 80kW, los avances tecnológicos como el aumento de la densidad de potencia y la disminución del contenido de platino en el cátodo hacen posible cada vez un menor coste total del sistema. Aunque, como se ha comentado, existen otros factores que pueden aumentar este coste y finalmente la estimación del coste total para el año 2018 supone un aumento de 1,23 \$/kW con respecto al año anterior. Este aumento del coste a pesar de los avances tecnológicos va ligado a una serie de mejoras del sistema, como un aumento del rendimiento, un mejor funcionamiento a baja potencia y una mayor durabilidad.

El contenido de platino y acero inoxidable del catalizador y las placas bipolares hace que el coste de estos componentes no dependa del volumen de producción, sino del propio coste de la materia prima. Por tanto, se deben buscar alternativas viables para tratar de evitar la utilización de estos materiales.

La unidad CEM necesita nuevos diseños y otros métodos de fabricación para poder disminuir el coste del circuito de aire perteneciente al balance de planta. Esta unidad es la que provoca mayor variación del coste del sistema, seguido por la estequiometría del aire.

En general, este análisis y proyección de costes realizados proporciona una información relevante que ayuda a orientar el desarrollo de los componentes de la pila de combustible para tratar de conseguir los objetivos propuestos por el DOE, entre ellos, llegar al mismo coste unitario que los vehículos de motor de combustión interna convencionales.

3.2 Análisis del coste total del ciclo de vida de un FCEV.

El análisis del coste total del ciclo de vida se define como un método para determinar el valor de mercado, en este caso de un vehículo de pila de combustible (FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle), que tiene en cuenta además del precio inicial del vehículo, el coste del combustible necesario durante toda su vida útil y los gastos de mantenimiento. Comparar costes del ciclo de vida hace posible evaluar si es mejor un vehículo económico pero menos eficiente (bajo coste inicial y altos costes operativos) o un vehículo caro pero con mayor eficiencia (alto coste inicial y bajos costes operativos) [50].

3.2.1 Análisis del informe de Strategic Analysis (2018).

Se analiza el informe realizado por Strategic Analysis Inc.[50], en el que se incorporan en 2018 el coste del sistema de almacenamiento de hidrógeno y otros componentes pertenecientes al vehículo (batería, motor, frenos...) al análisis del coste total del ciclo de vida; lo que permite calcular el valor presente del coste total de propiedad (TCO) durante la vida útil del vehículo.

No se incluye en este informe gastos de mantenimiento, aunque se esperan que sean mucho menores que los de un vehículo de motor de combustión interna convencional, ya que se evitan cambios de aceite, cambio de bujías y otros gastos de mantenimiento asociados a las partes móviles de los motores de combustión, que se evitan debido a la ausencia de estas partes móviles en el stack. Tampoco se incluye en el análisis el gasto del seguro del vehículo.

Para analizar el coste del ciclo de vida han sido necesarias algunas suposiciones. Entre las más relevantes se encuentran[50]:

- Durabilidad del stack igual a la vida útil del vehículo [47].
- Tiempo de vida: 15 años.
- Distancia conducida anualmente: 12.000 millas (19.312 kms).
- Eficiencia del sistema: 47%.
- Coste del combustible: 5 \$/kg H₂.

El coste del hidrógeno varía según la fuente de producción, que puede ser mediante combustibles fósiles y biomasa o mediante energías renovables a través de la electrólisis del agua. Actualmente, el gas natural es la principal fuente de producción del hidrógeno y representa en torno a tres cuartas partes de la producción global, cuyo valor aproximado es 70 millones de toneladas. Este valor representa aproximadamente un 6% del uso global del gas natural. Al gas natural le sigue el carbón, que tiene un papel importante en China y la cantidad restante de hidrógeno producido es a partir del uso de petróleo y electricidad [51].

La suposición del coste de 5\$/kg H₂ realizada para el análisis del ciclo de vida, cobra sentido si se visualizan los costes de producción del hidrógeno según la fuente de procedencia (ilustración 33). En la siguiente ilustración se aprecia que el coste del hidrógeno procedente de energías renovables se encuentra entre 3-7\$/kg. H₂, mientras que el coste del hidrógeno que proviene del gas natural se encuentra entre 0,9-3,2\$/kg. H₂ [51]. Con una tendencia actual hacia el aumento de la producción del hidrógeno verde, es decir, el procedente de energías renovables, se entiende que la suposición del coste realizada en el análisis se acerque más a los costes producidos por este tipo de medio de producción. Aunque se estima que se reduzca en torno a un 30% el coste del hidrógeno procedente de energías renovables para el año 2030, como resultado de una disminución de los costes de las energías renovables y un aumento de la producción del hidrógeno [51].

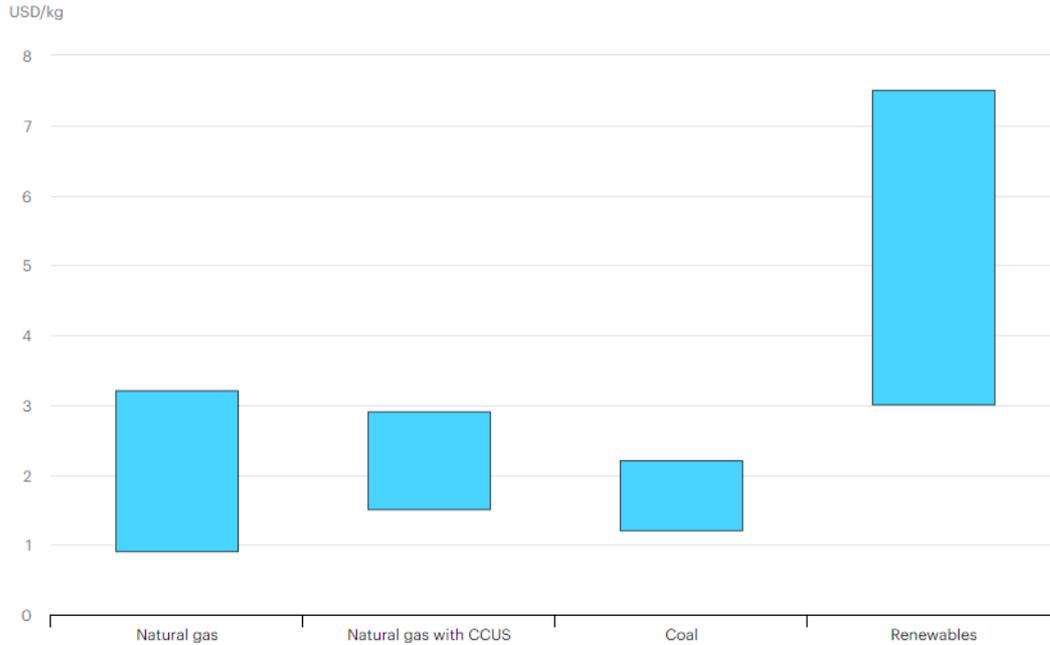


Ilustración 33: Costes (\$/kg H2) de la producción de hidrógeno según la fuente de producción (2018)[51].

A corto plazo (hasta 2030), lo más probable es que el menor coste de hidrógeno sea el producido por combustibles fósiles. Teniendo en cuenta que, excepto en el caso del hidrógeno producido con carbón, el coste del combustible supone uno de los componentes más influyentes en el coste de producción; el coste del hidrógeno en un futuro va a depender, por tanto, del coste del gas y de la electricidad o de parámetros que influyan en esos costes. Se muestra a continuación en la ilustración 34, una estimación del coste de producción del hidrógeno según la fuente de fabricación para 2030, desglosando las variables que afectan a este coste.

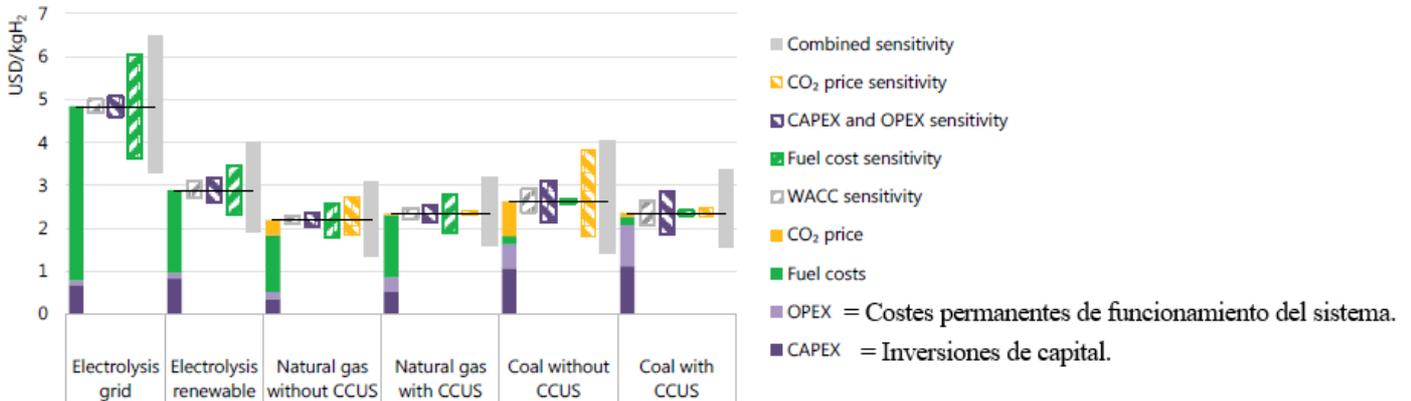


Ilustración 34: Costes de producción del hidrógeno según las fuentes de producción (2030)[26].

Los costes del sistema de pila de combustible y del sistema de almacenamiento de hidrógeno utilizados para el cálculo del coste del ciclo de vida, son los costes de referencia que se estimaron en el informe de la proyección de costes realizado por Strategic Analysis [45]. El resto de costes de los componentes del vehículo se consideran constantes entre 1.000 y 100.000 sistemas al año, mientras que para 500.000 disminuyen ligeramente, como se puede observar en la siguiente ilustración:

		2018 FCEV Price Table					
Annual Production Rate		1,000	10,000	20,000	50,000	100,000	500,000
Fuel Cell System Cost		\$14,485	\$6,775	\$5,174	\$4,342	\$3,974	\$3,567
H ₂ Storage System Cost		\$7,518	\$4,417	\$4,041	\$3,477	\$3,007	\$2,631
Battery Cost		\$1,813	\$1,813	\$1,813	\$1,813	\$1,813	\$1,300
Electric Motor/Inverter Drive Cost		\$3,600	\$3,600	\$3,600	\$3,600	\$3,600	\$3,150
Gearbox Cost		\$400	\$400	\$400	\$400	\$400	\$350
Glider Cost		\$11,000	\$11,000	\$11,000	\$11,000	\$11,000	\$11,000
Braking System Cost		\$400	\$400	\$400	\$400	\$400	\$375
Climate/HVAC System Cost		\$400	\$400	\$400	\$400	\$400	\$375
Total Fuel Cell Vehicle System Cost		\$39,617	\$28,805	\$26,828	\$25,433	\$24,594	\$22,748
Production Overhead Markup		\$6,735	\$4,897	\$4,561	\$4,324	\$4,181	\$3,867
Marketing/Warranty Markup		\$9,310	\$6,769	\$6,305	\$5,977	\$5,780	\$5,346
Overhead/Profit Markup		\$3,764	\$2,736	\$2,549	\$2,416	\$2,336	\$2,161
Auto System Price		\$59,425	\$43,208	\$40,242	\$38,149	\$36,891	\$34,122

Ilustración 35: Desglose del coste de un FCEV[50].

Se tiene en cuenta el coste de adquisición del vehículo, ya mostrado en la ilustración 35, que junto con los costes obtenidos de las suposiciones nombradas anteriormente (necesarias para caracterizar un análisis de este tipo), se consiguen unos datos estimados del coste del ciclo de vida del automóvil. Estos datos son mostrados en dólares por milla recorrida y varían en función de la tasa de producción anual, como se muestran en la siguiente tabla:

		2018 Auto System Life Cycle Costs					
Annual Production Rate		1,000	10,000	20,000	50,000	100,000	500,000
Total Auto System Price (After Markup)		\$59,425	\$43,208	\$40,242	\$38,149	\$36,891	\$34,122
Annual Fuel Cost		\$976	\$976	\$976	\$976	\$976	\$976
Lifecycle Fuel Cost		\$10,127	\$10,127	\$10,127	\$10,127	\$10,127	\$10,127
Net Present Value of Recoverable Pt in System at End of System Lifetime		\$185	\$185	\$185	\$185	\$185	\$185
Final Pt Net Present Value Recovered		\$120	\$120	\$120	\$120	\$120	\$120
Total Lifecycle Cost		\$69,432	\$53,215	\$50,249	\$48,157	\$46,898	\$44,129
Total Lifecycle Cost (\$/mile)		\$0.386	\$0.296	\$0.279	\$0.268	\$0.261	\$0.24516

Ilustración 36: Coste del ciclo de vida de un FCEV (2018)[50].

Se estudia también la variación del coste del ciclo de vida con respecto a una modificación en la eficiencia del sistema, con el objetivo de identificar el punto óptimo que tenga el menor coste inicial posible con el menor coste operativo. Como se observa en la gráfica de la ilustración 37, el coste total del ciclo de vida disminuye prácticamente de manera lineal con un aumento de la eficiencia, llegando a su mínimo coste en torno al 54% de eficiencia, aunque no de forma muy significativa.

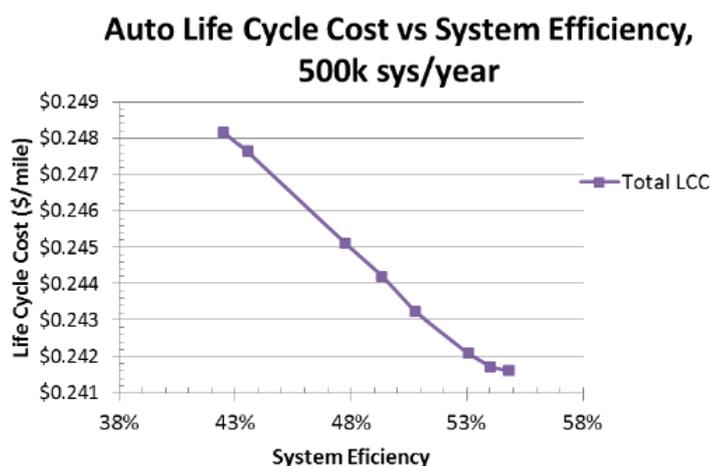


Ilustración 37: Variación del coste del ciclo de vida con respecto a la eficiencia[50].

Con las mismas suposiciones anteriores, incluidas la eficiencia del sistema (47%), el coste de combustible (5\$/kg. H₂), el tiempo de vida útil (15 años) y otras ya mencionadas, se estima un coste del ciclo de vida del sistema en 2025, en el que, gracias a menor contenido de platino, mayor densidad de potencia y una reducción del coste capital, se consiguen menores costes totales como se muestra a continuación:

Annual Production Rate	2025 Auto System Life Cycle Costs					
	1,000	10,000	20,000	50,000	100,000	500,000
Total Auto System Price (After Markup)	\$56,701	\$41,808	\$39,104	\$37,159	\$35,939	\$33,237
Annual Fuel Cost	\$976	\$976	\$976	\$976	\$976	\$976
Lifecycle Fuel Cost	\$10,127	\$10,127	\$10,127	\$10,127	\$10,127	\$10,127
Net Present Value of Recoverable Pt in System at End of System Lifetime	\$102	\$102	\$102	\$102	\$102	\$102
Final Pt Net Present Value Recovered	\$67	\$67	\$67	\$67	\$67	\$67
Total Lifecycle Cost	\$66,762	\$51,869	\$49,165	\$47,220	\$46,000	\$43,298
Total Lifecycle Cost (\$/mile)	\$0.371	\$0.288	\$0.273	\$0.262	\$0.256	\$0.241

Ilustración 38: Coste del ciclo de vida de un FCEV (2025)[50].

3.2.2 Comparativa entre los vehículos de pila de combustible y los vehículos eléctricos.

El coste total de propiedad de un vehículo es solo uno de los muchos factores que se tiene en cuenta a la hora de adquirir un automóvil, por ejemplo, la autonomía es un criterio que tienen en cuenta muchos de los compradores. La autonomía media real de los BEVs se encuentra en torno a 250 kilómetros, mientras que los FCEVs más vendidos, como el Toyota Mirai o el Hyundai Nexa (ya analizados en capítulos anteriores), ofrecen una autonomía real de en torno a 400 kilómetros. Sin embargo, este rango adicional que ofrecen los FCEVs suele ir ligado a un mayor coste de adquisición del vehículo[26].

Otro punto que determinará la competitividad económica de los FCEVs es la tasa de utilización de las hidrogeneras. Se estima que en la fase de implementación inicial, el coste del hidrógeno como combustible oscile entre el 12% y el 22% del coste total de propiedad, que son 9\$/kg H₂ y 18\$/kg H₂ respectivamente [26]. El coste adicional del hidrógeno que pueden agregar las hidrogeneras depende de dos variables, el tamaño de la hidrogenera y su utilización. Por ejemplo, para una estación con una capacidad de 200kg de H₂ al día si funciona entre el 10% y el 33% de su capacidad, tienen un margen de mejora de entre 4 y 13 \$/kg H₂. Asegurar una alta tasa de utilización de estas estaciones de servicio es importante para reducir los costes en las fases iniciales de implementación de los FCEVs [26].

Los FCEVs son diseñados normalmente, como ya se ha mencionado, para tener un mayor rango de distancia que los vehículos eléctricos, que sumado al alto coste de las pilas de combustible y de los tanques de almacenamiento, suelen ser más caros que los mismos. Si gracias a la economía de escala se redujesen los costes de la pila de combustible a 50\$/kW y los costes de las baterías a 100\$/kWh, entonces para un mismo rango alrededor de 400 kilómetros, los FCEVs se volverían competitivos con los BEVs como se observa en la ilustración 39 [26]. Si se considerasen los costes añadidos para mejorar la durabilidad y el coste de la pila de combustible aumentase a 75 \$/kW los FCEVs serían competitivos con los BEVs para un rango en torno a 500 kilómetros [26].

En el siguiente gráfico de barras se muestra una comparativa del coste total de propiedad de los diferentes tipos de vehículos que funcionan con baterías en la actualidad y una previsión a corto plazo. Gráfico que incluye el aumento del coste estimado que supondría una baja tasa de utilización de la infraestructura, que como se aprecia es de mayor relevancia en los vehículos de pila de combustible.

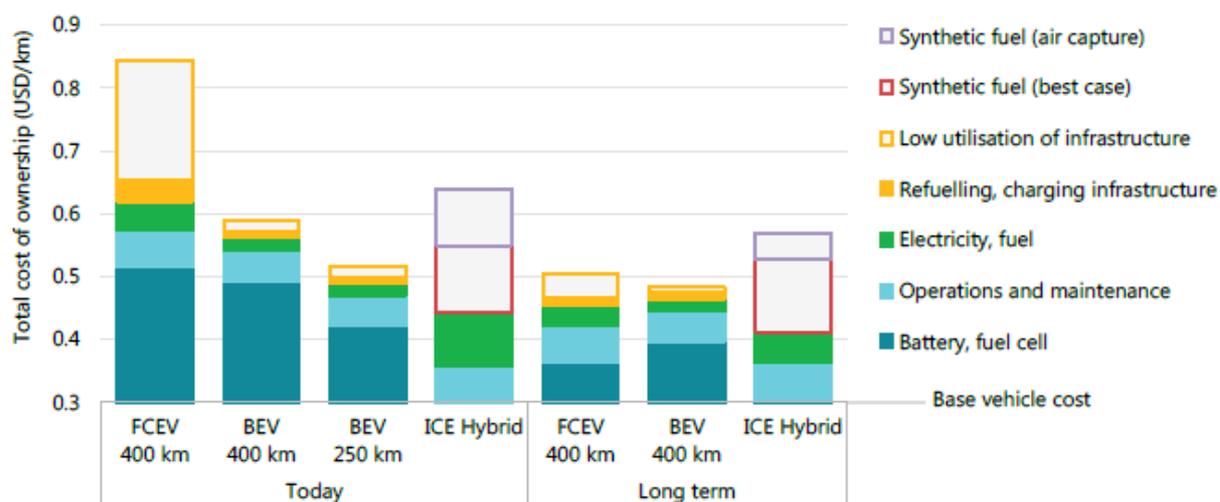


Ilustración 39: Coste total de propiedad según el rango y el tipo de vehículo[26].

Ambos tipos de vehículos pueden complementarse en un futuro como opciones alternativas según las preferencias del consumidor. Los FCEVs por lo general nos ofrecen un mayor rango de distancia recorrida y un repostaje más rápido, que puede resultar decisivo para los consumidores que prioricen estas características.

3.2.3 Análisis del coste total de propiedad de un autobús según el tipo de sistema de propulsión.

El coste de adquisición de un automóvil varía entre un 70% y un 95% del coste total de propiedad, dependiendo del tipo de automóvil adquirido. Mientras que, en vehículos más grandes y pesados que tienden a hacer más distancias, el coste de combustible representa una mayor parte de los costes totales. Para camiones el coste de adquisición varía entre el 40% y el 70% del coste total de propiedad [26], esto se traduce en la gran importancia que tiene el coste del hidrógeno como combustible para este tipo de vehículos pesados.

A continuación, se presenta un análisis en profundidad del coste total de propiedad de un autobús realizado en 2019, distinguiendo entre si está propulsado por pila de combustible, si se trata de un autobús eléctrico o con un motor de combustión convencional. La razón de un análisis de este tipo es la de entender exactamente que componentes están suponiendo un mayor coste actualmente, desde el punto de vista de la construcción del vehículo hasta la perspectiva de los costes de operación.

Como se puede observar en la ilustración 40, los FCEVs tienen el mayor coste cada 100 kilómetros (243,37 \$/100kms), seguido de los BEVs (165,92 \$/100kms) y por último los ICEV (124,96 \$/100kms)[52]. Datos que no sorprenden dado que los FCEVs y su infraestructura se encuentran todavía en fases iniciales de desarrollo y tiene gran margen de mejora conforme se siga investigando esta tecnología. La mayor diferencia entre los costes de adquisición de los diferentes tipos de vehículos se encuentra en el módulo energético; en el coste de adquisición de un FCEV, el módulo energético supone un 13% del coste total y a su vez, el sistema de pila de combustible y los tanques de almacenamiento suponen un 73% y un 15% del coste del módulo energético respectivamente. Estos dos componentes suponen la mayor parte de incremento de coste con respecto a los otros dos tipos de vehículos, costes que se esperan que disminuyan con el paso del tiempo [52]. Destaca que el mayor porcentaje (79%) del coste de adquisición de los vehículos de combustión interna (ICEV) sea el sistema de transmisión mecánica, mientras que en los FCEVs no suponga apenas un 37% [52].

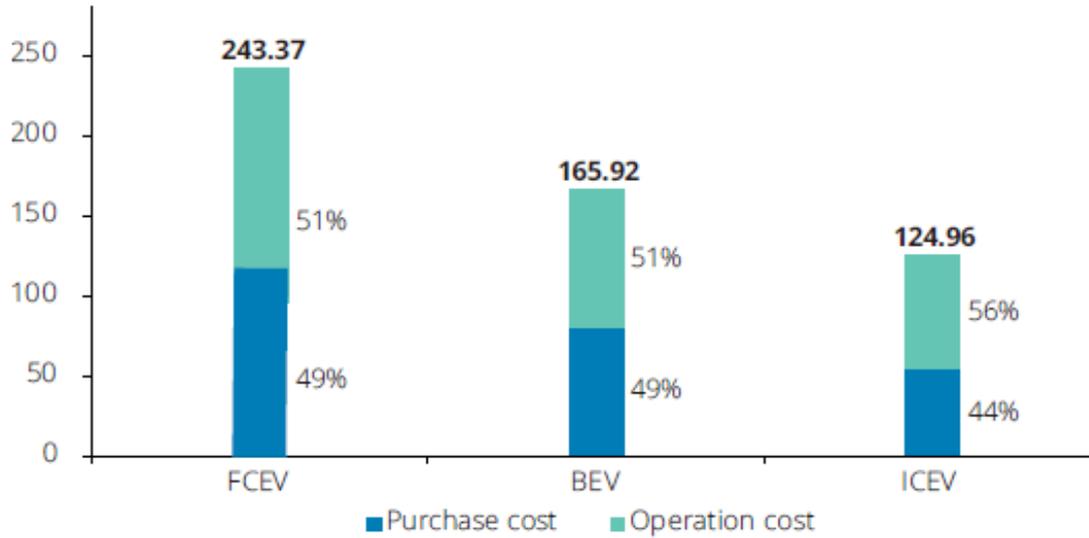


Ilustración 40: Desglose del coste total de la propiedad (\$/100kms) de un autobús según el tipo de vehículo[52].

Referente a los costes de operación de la ilustración 41, el coste del combustible para los FCEVs constituye el mayor porcentaje del coste de operación debido al alto precio del hidrógeno (2019), mientras que en los BEVs el coste de la electricidad supone únicamente un 16% del coste total de operación. Con respecto al mantenimiento, tanto los FCEVs y los BEVs tienen menos costes asociados a este tema que los ICEV dado que la mecánica del motor eléctrico es más simple. En contrapartida, los recambios tanto de la pila de combustible en los FCEVs como de la batería en los BEVs suponen un coste adicional no despreciable. Los costes de estos recambios se pueden reducir rápidamente tan pronto como la tecnología madure [52].

Otro factor que afecta al coste operativo proviene de la construcción de la infraestructura necesaria para los FCEVs y para los BEVs, que requieren de una gran cantidad de inversión inicial. Según el modelo operativo se pueden valorar estos costes de formas muy distintas, la siguiente gráfica solo muestra una estimación ilustrativa.

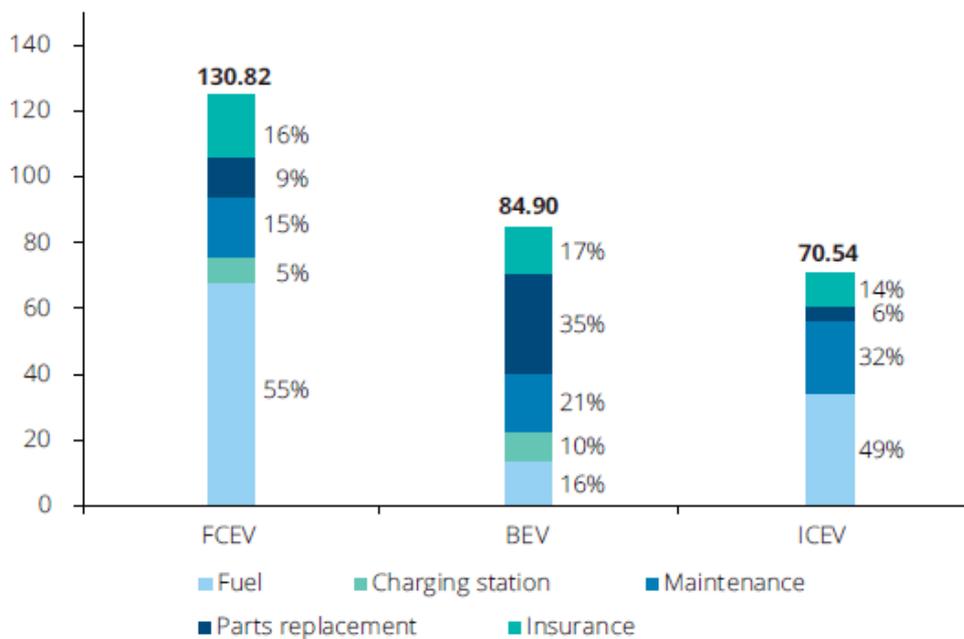


Ilustración 41: Desglose del coste de operación (\$/100kms) de un autobús (2019)[52].

Se muestra a continuación una gráfica que ilustra una proyección de futuro según el modelo del coste total de propiedad (TCO), realizando una predicción según el tipo de autobús hasta 2029. Según este modelo teórico, en 2026 el coste total de propiedad de un autobús de pila de combustible será menor que el de un autobús con motor de combustión interna y en 2027 será menor que un autobús eléctrico.

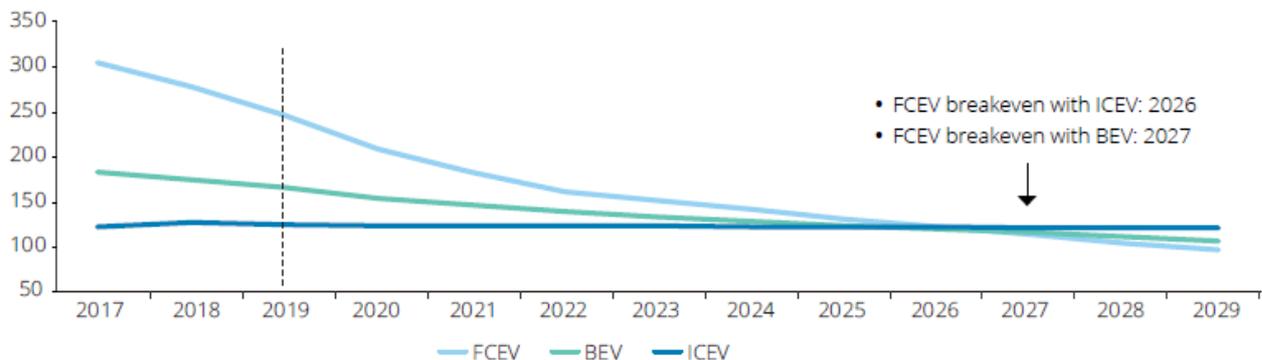


Ilustración 42: Proyección de futuro del coste total de propiedad (\$/100kms) de un autobús según su sistema de propulsión [52].

En conclusión, según este análisis de costes realizado, estima que el coste total de propiedad de los FCEVs disminuirá casi un 50% en los próximos 10 años. Esta disminución se debe principalmente a un menor coste de fabricación de un sistema de pila de combustible, un menor coste del hidrógeno como combustible y un menor coste en la infraestructura. El precio del sistema de pila de combustible está relacionado con el precio de compra y de los repuestos del vehículo, se estima que bajará desde 1500 \$/kW en 2019 hasta 600 \$/kW en 2029, gracias a una mejora en los precios de fabricación y a una mejora en la economía de escala. También se prevé un aumento del ciclo de vida desde 25.000 horas en 2019 hasta 30.000 horas en 2026, que junto con la disminución del coste del sistema se traduce en la disminución del 50% previamente nombrada [52].

3.3 Variación del coste de las pilas de combustible tipo PEM según sus condiciones de operación.

A lo largo de este trabajo, se ha comentado la importancia de reducir los costes y aumentar la durabilidad de las pilas de combustible tipo PEM para lograr un mayor despliegue comercial de esta tecnología. Las condiciones de operación de la celda de combustible y del stack influyen tanto en el coste como en la durabilidad, por lo tanto, se han incrementado las actividades de investigación en términos de análisis experimental y en el desarrollo de herramientas de simulación y modelado[53].

El ajuste de las condiciones de operación para optimizar la potencia de salida da lugar a pilas más compactas, con menos materiales y, por tanto, menos costes asociados. Este ajuste también supone una mejora en la durabilidad, reduciendo la degradación provocada por gradientes de temperatura o por un secado excesivo de la membrana[53].

El Centro Común de Investigación (JRC: Joint Research Centre) de la Comisión Europea establece un protocolo a seguir para realizar pruebas de laboratorio a pilas de combustible destinadas a las aplicaciones de automoción, este protocolo está basado en condiciones realistas a las que someten en dichas aplicaciones.

A continuación, se emplean datos experimentales obtenidos de trabajos previos, como el realizado para una pila de combustible tipo PEM de 50 cm² siguiendo el protocolo de pruebas del JRC[53], para hacer un estudio de costes del stack y del sistema de la pila de combustible en base a optimizaciones que se puedan realizar en las condiciones de operación. Para ello, se toma como ejemplo un stack comercial de automoción de 80kW, se supone esta potencia ya que es un valor suficiente para un automóvil ligero, por ejemplo, es la misma potencia que se toma en la proyección de costes realizada por Strategic Analysis Inc. para un sistema PEMFC de hidrógeno [45]. También se realiza la suposición de que está formado por celdas de combustible de 300 cm²; se extrapolan los datos obtenidos del análisis experimental [53] para determinar cuántas celdas de combustible son necesarias para alcanzar esos 80kW de potencia según como varíen las condiciones de operación, y de esta forma, estimar las condiciones de operación óptimas para reducir el coste del stack y del sistema.

En este análisis experimental [53] se incluyen estudios sobre el rendimiento de la celda, la eficiencia eléctrica y la degradación con los ciclos de carga. De acuerdo con el protocolo de pruebas se establecen unas condiciones de referencia que se establecen como punto de partida para realizar un análisis comparativo. Los cambios provocados en esas condiciones de referencia por el hecho de modificar un conjunto de variables es el objeto de análisis de este trabajo. Estas condiciones de referencia son las siguientes[54]:

- ❖ **Ánodo**
 - Temperatura: 80°C
 - Presión: 250 kPa
 - Humedad relativa: 50%
 - Estequiometría del combustible: $\lambda=1,3$
- ❖ **Cátodo.**
 - Temperatura del oxidante: 85°C
 - Presión absoluta del oxidante: 230 kPa
 - Humedad relativa: 30%
 - Estequiometría del aire: $\lambda=1,5$

En las pilas de combustible existen tres tipos de pérdidas, las pérdidas de activación son las de mayor importancia en cualquier rango de la densidad de corriente, pero en concreto, para bajas densidades de corriente es donde más afectan a las pérdidas de voltaje. Las pérdidas óhmicas disminuyen linealmente el voltaje de la pila. La proporción de estas pérdidas de voltaje con respecto a la densidad de corriente se pueden visualizar en la ilustración 43 [55]:

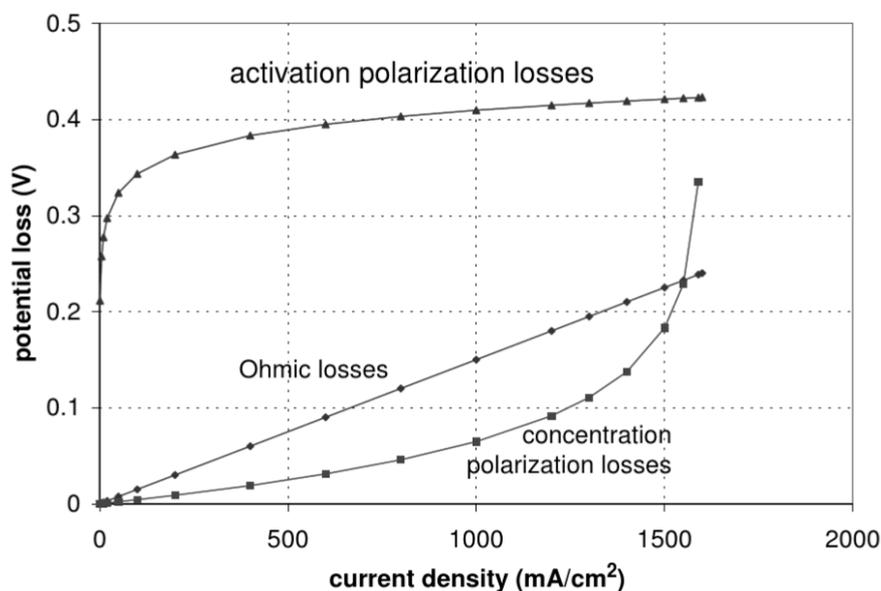


Ilustración 43: Pérdidas de voltaje en la pila de combustible [55].

En las curvas de polarización se representa el voltaje a la salida de la celda de combustible para una determinada densidad de corriente, estas curvas se utilizan para testear las variaciones de las variables de operación en la celda de combustible. La curva de polarización de una pila de combustible es formada restando las pérdidas de activación, las pérdidas óhmicas y las pérdidas de concentración de polarización del equilibrio potencial como se muestra en la ilustración 44 [55].

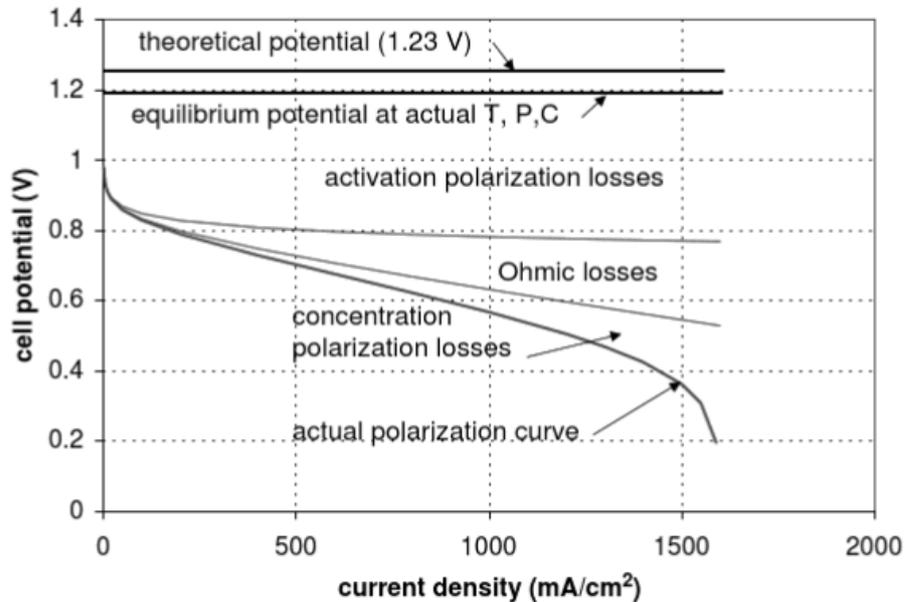


Ilustración 44: Curva de polarización y pérdidas en la pila de combustible [55].

En relación al análisis experimental [53] una vez finalizada la etapa de preparación de la celda, se inicia el experimento de la curva de polarización siguiendo un ajuste determinado en el que se realizan tres ensayos completos para garantizar la fiabilidad de los resultados. La curva de polarización correspondiente a las condiciones de referencia es usada como punto de partida para el análisis de las variaciones de las variables que se emplean para conocer cómo afectan sus variaciones al rendimiento de la pila. Se muestra a continuación la curva de polarización del análisis experimental:

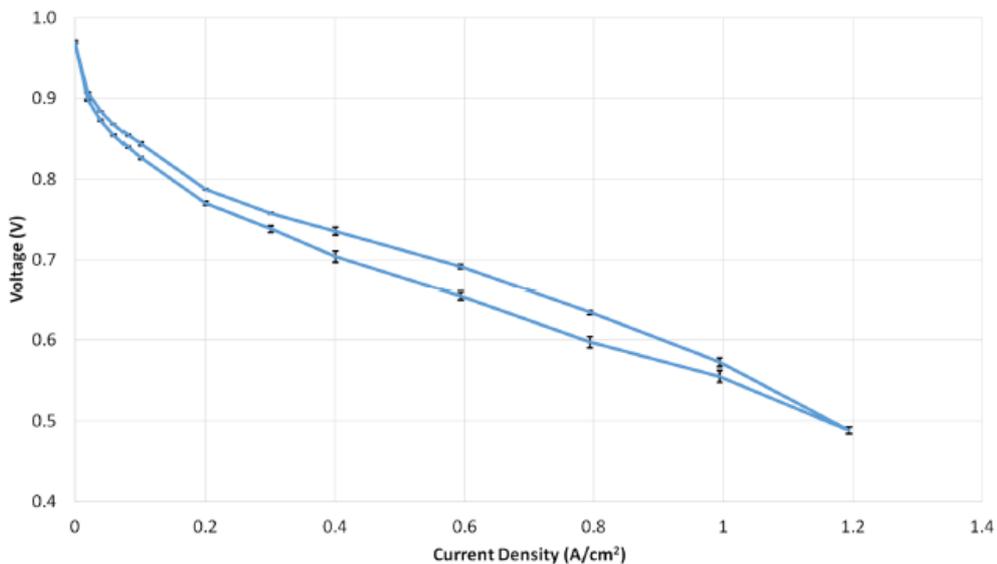


Ilustración 45: Curva de polarización para las condiciones de referencia [53].

3.3.1 Pruebas de temperatura.

El objetivo de estas pruebas es evaluar cómo afecta la temperatura de operación al rendimiento de la pila, ya que una alta temperatura o altos gradientes de temperatura pueden afectar a la degradación de la membrana y a la evacuación del calor, que a su vez influye en la cantidad de agua en la pila. Se muestran las curvas de polarización correspondientes a las pruebas de temperatura (ilustración 46), para unas temperaturas de operación de 70°C, 80°C y 85°C [53].

A partir de las curvas de polarización obtenidas para cada temperatura, se evalúa cuál sería el número de celdas necesarias para alcanzar la potencia de 80kW suponiendo que las celdas del stack tienen un área de 300 cm².

La potencia eléctrica obtenida de cada celda de combustible se calcula según la ecuación $P_{elec} = V * I$, el producto de esta potencia eléctrica con el número de celdas del stack da como resultado la potencia del stack, como se puede observar en esta ecuación $P_{stack} = P_{elec} * N^{\circ}celdas$. Gracias a estas dos ecuaciones y a los datos obtenidos de la curva de polarización se puede calcular el número de celdas necesario según cambien las diferentes variables de operación de la siguiente manera:

- 1) Se fija una de las dos variables de la curva, en este caso se mantiene el voltaje constante.
- 2) Se obtienen tres valores distintos de la densidad de corriente según cambien las condiciones de operación.
- 3) Estos valores obtenidos en la unidad A/cm^2 se multiplican por $300 cm^2$ (suposición del área de la celda de combustible) para obtener las intensidades correspondientes de la celda de combustible para cada condición de operación.
- 4) Se calculan las potencias eléctricas que aportan cada celda para cada intensidad empleando la primera ecuación descrita anteriormente ($P_{elec} = V * I$).
- 5) Teniendo como objetivo conseguir una potencia del stack de 80kW (suposición de potencia para un automóvil), se despeja el número de celdas necesario para cada potencia eléctrica obtenida anteriormente de la siguiente manera: $N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}}$.

Se supone constante el valor del voltaje igual a 0.65V, ya que es el valor acordado por los fabricantes para aplicaciones de automoción y se observan gráficamente (ilustración 46) los valores de salida de las densidades de corriente, en este caso son aproximadamente $0,72 A/cm^2$ para $T_{celda} = 70^{\circ}C$, $0,76 A/cm^2$ para $T_{celda} = 80^{\circ}C$ y $0,8 A/cm^2$ para $T_{celda} = 85^{\circ}C$.

Siguiendo la metodología de actuación descrita:

- $T_{celda} = 70^{\circ}C$.

$$I = 0,72 \frac{A}{cm^2} * 300cm^2 = 216 A$$

$$P_{elec} = V * I = 0,65 V * 216 A = 140,4 W$$

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{140,4 W} = 569,8 = 570 celdas$$

- $T_{celda} = 80^{\circ}C$.

$$I = 0,76 \frac{A}{cm^2} * 300cm^2 = 228 A$$

$$P_{elec} = V * I = 0,65 V * 228 A = 148,2 W$$

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{148,2 W} = 539,81 = 540 celdas$$

- $T_{celda} = 85^{\circ}C$.

$$I = 0,8 \frac{A}{cm^2} * 300cm^2 = 240 A$$

$$P_{elec} = V * I = 0,65 V * 240 A = 156 W$$

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{156 W} = 512,82 = 513 celdas$$

Como se puede apreciar en los cálculos realizados, para la temperatura de operación $T_{celda} = 70^{\circ}C$ se necesitarían 570 celdas de combustible dentro del stack para conseguir la potencia objetivo. Para $T_{celda} = 80^{\circ}C$ la densidad de corriente aumenta ligeramente y, por tanto, se necesitarían menos número de celdas (540 celdas de combustible). Mientras que, aumentando $5^{\circ}C$ más la temperatura de operación alcanzando los $85^{\circ}C$, aumenta aún más la densidad de corriente que ofrece cada celda, necesitando un total de 513 celdas para alcanzar la potencia necesaria.

Garantizar el menor número de celdas posibles es lo mejor para optimizar el diseño del stack, ya que reduce los costes totales, el peso y el volumen de la pila de combustible. Un menor peso y volumen pueden significar la posibilidad de implementación en algunos tipos de aplicaciones, por ejemplo, automóviles compactos.

Se concluye del estudio realizado en que el mejor resultado, si se busca optimizar el coste del stack y del sistema, es aumentar el valor de la temperatura de operación para conseguir un menor número de celdas de combustible dentro del stack.

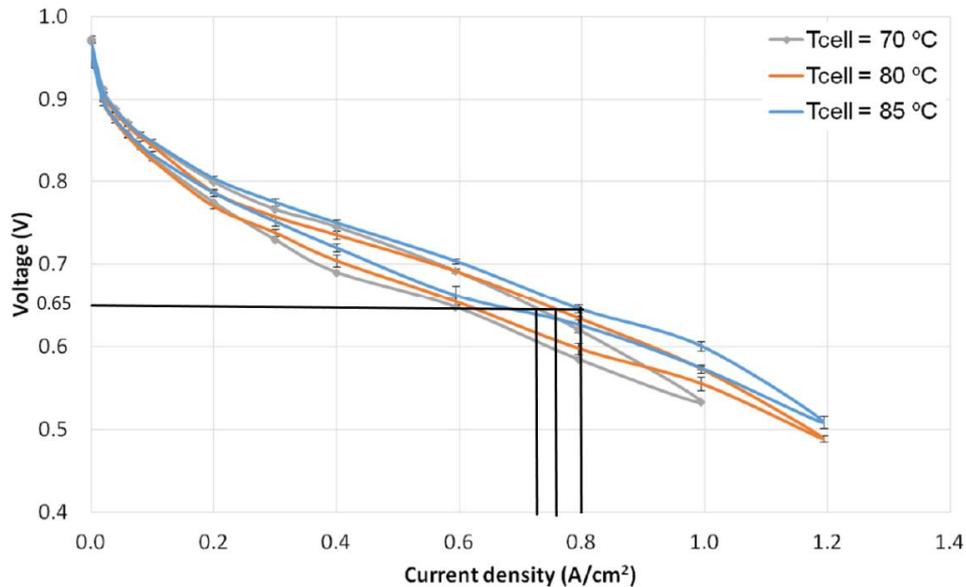


Ilustración 46: Curvas de polarización para las diferentes pruebas de temperatura [53].

Las conclusiones finales relacionadas con su influencia en los costes para un aumento de la temperatura de operación son las siguientes:

- Disminuyen las pérdidas de activación. Esta disminución de las pérdidas se traduce en una mayor densidad de corriente, lo que significa que para un mismo voltaje aumenta la potencia de la pila. A nivel de costes, este aumento de potencia implica una necesidad menor de cantidad de platino en el catalizador lo que reduce el coste final del stack.
- Mayor difusión de los reactivos. Tanto las placas bipolares como las capas de difusión de gases (GDLs) tienen la función de garantizar una buena difusión de los gases para que aumente el área activa de la membrana y mejore el rendimiento. Al tener una mayor difusión de los reactivos, se podría ahorrar en diferentes materiales de estos dos componentes del stack o en un menor volumen de los mismos.
- Mayor capacidad de los gases de evacuar el agua de la pila de combustible. Esta función de evacuar el agua de la membrana es vital para garantizar una buena conductividad eléctrica y así mejorar el rendimiento del stack. Tanto las placas bipolares como los GDLs se encargan también de garantizar una buena conductividad eléctrica y una buena evacuación del agua del stack, por tanto, si este aspecto se ha mejorado también se podrían disminuir los costes de estos dos componentes en este sentido.
- Menor durabilidad. Una mayor temperatura de operación, como ya se ha comentado, puede afectar a la durabilidad de la membrana. Por ello, sería necesario un mejor sistema de evacuación del calor, en este caso las placas bipolares realizan esta función por lo que una mejora en este aspecto encarecería el coste de las mismas.

Finalmente, se realiza un análisis de los resultados obtenidos en este estudio para poder estimar la variación del coste del stack y del sistema en función de la temperatura de operación de la celda de combustible.

En primer lugar, se supone un valor aproximado del coste de cada celda de combustible. En la proyección de costes realizada por Strategic Analysis Inc. para un sistema PEMFC de hidrógeno [45], se estima un coste del sistema de 3.500 \$ para un volumen de producción de 500.000 sistemas al año, este coste del sistema se divide en el coste del stack ~1.531\$ y en el coste del balance de planta ~1.969\$. Las características de este sistema son 80kW de potencia y un voltaje de 0,663V por lo que las estimaciones de costes son extrapolables a nuestro estudio. Para este sistema[45] se conocen el número de celdas de combustible que conforman el stack, en este

caso son 377 celdas, por lo tanto, se puede estimar el coste de cada celda de combustible por separado y sería igual a: $C_{celda} \left(\frac{\$}{celda} \right) = C_{stack} / N^{\circ}celdas = \frac{1.531\$}{377celdas} = 4,061 \frac{\$}{celda}$

A partir de esta estimación del coste unitario de cada celda, se ilustra el cambio en el coste del stack que supondría la variación de la temperatura de operación:

➤ $T_{celda} = 70^{\circ}C$.

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{140,4 W} = 569,8 = 570 celdas$$

$$C_{stack}(70^{\circ}C) = N^{\circ}celdas \cdot C_{celda} = 570 celdas \cdot 4,061 \frac{\$}{celda} = 2.314,77 \$$$

➤ $T_{celda} = 80^{\circ}C$.

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{148,2 W} = 539,81 = 540 celdas$$

$$C_{stack}(80^{\circ}C) = N^{\circ}celdas \cdot C_{celda} = 540 celdas \cdot 4,061 \frac{\$}{celda} = 2.192,94 \$$$

➤ $T_{celda} = 85^{\circ}C$.

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{156 W} = 512,82 = 513 celdas$$

$$C_{stack}(85^{\circ}C) = N^{\circ}celdas \cdot C_{celda} = 513 celdas \cdot 4,061 \frac{\$}{celda} = 2.083,29 \$$$

Se aprecia que a mayor valor de la temperatura de operación se obtiene una reducción del coste del stack, para un incremento de temperatura de $10^{\circ}C$ ($\Delta T = 80^{\circ}C - 70^{\circ}C$) se reduce el coste del stack en 121,83 \$ ($\Delta C_{stack} = 2.192,94 \$ - 2.314,77 \$$). El coste del balance de planta se supone constante, por lo que la reducción de coste del sistema sería la misma (121,83 \$) para un $\Delta T = 10^{\circ}C$.

Un aumento de $15^{\circ}C$ de la temperatura de operación supone una reducción de 231,48 \$ ($\Delta C_{stack} = 2.083,29 \$ - 2.314,77 \$$) del coste del stack. Este hecho confirma que la temperatura de operación que optimiza los costes del sistema tiene que ser la máxima posible, teniendo en cuenta que una temperatura excesiva afecta a la degradación de la membrana y, por tanto, a su durabilidad.

3.3.2 Pruebas de presión.

La presión de operación afecta al rendimiento de la pila en diferentes aspectos. Las variaciones en los valores de la presión de operación afectan al valor del voltaje del circuito abierto (OCV), al posible cruce del combustible por diferencias de presión o a la manera en la que se gestiona el agua dentro de la celda [53],[56].

En la ilustración 47 se observan las diferentes curvas de polarización según la presión elegida, en este caso se prueban las presiones del ánodo 160, 190 y 250 kPa y las presiones del cátodo 140, 190 y 230 kPa respectivamente. A partir de estas curvas de polarización se vuelve a evaluar cuál sería el número de celdas necesarias para nuestro ejemplo ya descrito y como afectan los cambios de presión en dicho número.

Al igual que en el apartado anterior, se supone constante el valor del voltaje (0.65V) y se observan gráficamente (ilustración 47) los valores de salida de las densidades de corriente, en este caso son aproximadamente $0,37 A/cm^2$ para las presiones del ánodo y del cátodo 160kPa y 140kPa respectivamente, $0,85 A/cm^2$ para las presiones del ánodo y del cátodo 190kPa y 190kPa respectivamente y $0,77 A/cm^2$ para las presiones del ánodo y del cátodo 250kPa y 230kPa respectivamente.

Se emplea la misma metodología que en el apartado anterior y se obtienen los siguientes resultados:

➤ $P_{ánodo} = 160kPa$ y $P_{cátodo} = 140 kPa$.

$$I = 0,37 \frac{A}{cm^2} * 300cm^2 = 111 A$$

$$P_{elec} = V * I = 0,65 V * 111 A = 72,15 W$$

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{72,15 W} = 1.108,8 = 1.109 celdas$$

➤ $P_{ánodo} = 190kPa$ y $P_{cátodo} = 190 kPa$.

$$I = 0,85 \frac{A}{cm^2} * 300cm^2 = 255 A$$

$$P_{elec} = V * I = 0,65 V * 255 A = 165,75 W$$

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{165,75 W} = 482,65 = 483 celdas$$

➤ $P_{ánodo} = 250kPa$ y $P_{cátodo} = 230 kPa$.

$$I = 0,77 \frac{A}{cm^2} * 300cm^2 = 231 A$$

$$P_{elec} = V * I = 0,65 V * 231 A = 150,15 W$$

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{150,15 W} = 532,8 = 533 celdas$$

Según los resultados obtenidos, resulta inviable operar con una presión en torno a 150kPa debido al alto número de celdas de combustible (~1.109 *celdas*) que serían necesarias para obtener la potencia indicada. Como se ha descrito anteriormente, la mejor forma de optimizar el coste del stack y del sistema es consiguiendo el menor número de celdas posibles para reducir el peso, volumen y consecuentemente, el coste del stack. En el caso analizado el menor número de celdas es 483 y se consigue para una misma presión del ánodo y del cátodo (190kPa).

Destaca que, para unas mayores presiones del ánodo y del cátodo (250kPa/230kPa) se obtengan un mayor número de celdas, ya que normalmente aumentar la presión de operación implica un aumento del rendimiento de la celda, gracias a factores como la reducción de las pérdidas de activación o el aumento del contenido de agua en la membrana que trae consigo una mejora en la conductividad eléctrica de la misma. La razón más probable por la que el número de celdas sea mayor es el gradiente de presión entre el ánodo y el cátodo de 20kPa, que ensalza el efecto de cruce lo que afecta negativamente al rendimiento de la celda.

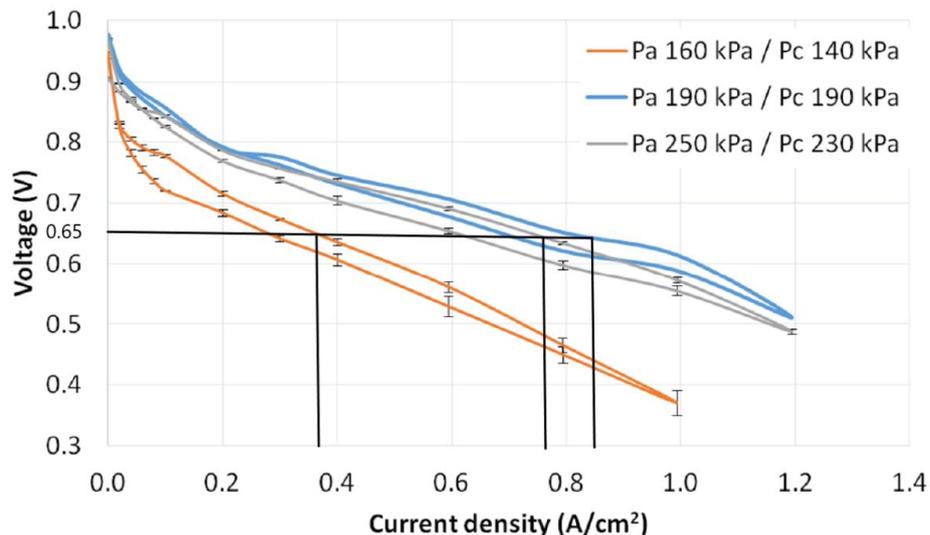


Ilustración 47: Curvas de polarización para las diferentes pruebas de presión [53].

Las conclusiones finales relacionadas con su influencia en los costes para un aumento de la presión de operación son las siguientes:

- Disminuyen las pérdidas de activación. Al igual que aumentando la temperatura de operación, se traduce en una mayor densidad de corriente, lo que significa que para un mismo voltaje aumenta la potencia de la pila. A nivel de costes, este aumento de potencia podría implicar una necesidad menor de cantidad de platino en el catalizador o una disminución del número de celdas del stack, lo que reduce el coste final del stack.
- Aumento de la cantidad de agua en la membrana. Aumentar la presión de operación contribuye a la fase líquida del agua consiguiendo una mejor hidratación de la membrana. Esto implica un aumento en la conductividad eléctrica de la membrana, que a nivel de costes podría suponer un ahorro en los materiales de fabricación de los elementos de la celda encargados de transportar esta electricidad, como son las placas bipolares, las capas de difusión de gases y los colectores.

A partir de la estimación del coste unitario de cada celda ($4,061 \frac{\$}{\text{celda}}$), cuyas hipótesis se justifican en el apartado anterior, se ilustra el cambio en el coste del stack que supondría la variación de la presión de operación:

- $P_{\text{ánodo}} = 160 \text{ kPa}$ y $P_{\text{cátodo}} = 140 \text{ kPa}$.

$$N^{\circ} \text{celdas} = \frac{P_{\text{stack}}}{P_{\text{elec}}} = \frac{80.000 \text{ W}}{72,15 \text{ W}} = 1.108,8 = 1.109 \text{ celdas}$$

$$C_{\text{stack}}(160 \text{ kPa y } 140 \text{ kPa}) = N^{\circ} \text{celdas} \cdot C_{\text{celda}} = 1.109 \text{ celdas} \cdot 4,061 \frac{\$}{\text{celda}} = 4.503,65 \$$$

- $P_{\text{ánodo}} = 190 \text{ kPa}$ y $P_{\text{cátodo}} = 190 \text{ kPa}$.

$$N^{\circ} \text{celdas} = \frac{P_{\text{stack}}}{P_{\text{elec}}} = \frac{80.000 \text{ W}}{165,75 \text{ W}} = 482,65 = 483 \text{ celdas}$$

$$C_{\text{stack}}(190 \text{ kPa y } 190 \text{ kPa}) = N^{\circ} \text{celdas} \cdot C_{\text{celda}} = 483 \text{ celdas} \cdot 4,061 \frac{\$}{\text{celda}} = 1.961,46 \$$$

- $P_{\text{ánodo}} = 250 \text{ kPa}$ y $P_{\text{cátodo}} = 230 \text{ kPa}$.

$$N^{\circ} \text{celdas} = \frac{P_{\text{stack}}}{P_{\text{elec}}} = \frac{80.000 \text{ W}}{150,15 \text{ W}} = 532,8 = 533 \text{ celdas}$$

$$C_{\text{stack}}(250 \text{ kPa y } 230 \text{ kPa}) = N^{\circ} \text{celdas} \cdot C_{\text{celda}} = 533 \text{ celdas} \cdot 4,061 \frac{\$}{\text{celda}} = 2.164,51 \$$$

En este caso no se podría decir que el aumento de la presión del ánodo y del cátodo supongan siempre una reducción del coste del stack. Porque a pesar de que, para un aumento de la presión del ánodo de $\Delta P = 30 \text{ kPa}$ y un aumento de la presión del cátodo de $\Delta P = 50 \text{ kPa}$ se reduzca considerablemente el coste del stack ($\Delta C_{\text{stack}} = 1.961,46 \$ - 4.503,65 \$ = -2.542,19 \$$), en el caso en el que se ha aumentado la presión del ánodo hasta 250kPa y la presión del cátodo hasta 230kPa ha provocado un ligero aumento del coste del stack ($\Delta C_{\text{stack}} = 2.164,51 \$ - 1.961,46 \$ = 203,05 \$$) con respecto a los 190kPa de la segunda prueba. Como se ha comentado previamente, el motivo más probable de ello sea el mayor gradiente de presión entre el ánodo y el cátodo de la tercera prueba.

3.3.3 Pruebas de estequiometría del cátodo.

Las pruebas de estequiometría del cátodo mostraron la importancia del flujo de aire del cátodo en el rendimiento final de la celda de combustible. En estas pruebas se analizó la influencia del flujo másico de aire suministrado en términos de transporte de oxígeno, capacidad de eliminación de agua líquida y también de secado de la membrana, todo ello en función de la humedad relativa del aire [53].

Se pueden visualizar las diferentes curvas de polarización obtenidas en función de la variación de la

estequiometría del cátodo en la ilustración 48, las diferentes curvas han sido calculadas para los valores estequiométricos 1.3, 1.5, 2.0 y 3.5.

Repitiendo las suposiciones anteriores ($P_{stack} = 80kW, V = 0,65 V(cte)$), se visualizan los valores de salida aproximados de las densidades de corriente según los valores de la estequiometría del cátodo, para $\lambda = 1.3 \rightarrow 0,57 A/cm^2$, para $\lambda = 1.5 \rightarrow 0,75 A/cm^2$, para $\lambda = 2.0 \rightarrow 0,7 A/cm^2$ y para $\lambda = 3.5 \rightarrow 0,47 A/cm^2$.

Se utiliza la misma metodología que en apartados anteriores y se obtienen los siguientes resultados:

➤ $\lambda = 1.3 \rightarrow 0,57 A/cm^2$.

$$I = 0,57 \frac{A}{cm^2} * 300cm^2 = 171 A$$

$$P_{elec} = V * I = 0,65 V * 171 A = 111,15 W$$

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{111,15 W} = 719,75 = 720 celdas$$

➤ $\lambda = 1.5 \rightarrow 0,75 A/cm^2$.

$$I = 0,75 \frac{A}{cm^2} * 300cm^2 = 225 A$$

$$P_{elec} = V * I = 0,65 V * 225 A = 146,25 W$$

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{146,25 W} = 547 celdas$$

➤ $\lambda = 2.0 \rightarrow 0,7 A/cm^2$.

$$I = 0,7 \frac{A}{cm^2} * 300cm^2 = 210 A$$

$$P_{elec} = V * I = 0,65 V * 210 A = 136,5 W$$

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{136,5 W} = 586,1 = 587 celdas$$

➤ $\lambda = 3.5 \rightarrow 0,47 A/cm^2$.

$$I = 0,47 \frac{A}{cm^2} * 300cm^2 = 141 A$$

$$P_{elec} = V * I = 0,65 V * 141 A = 91,65 W$$

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{91,65 W} = 872,89 = 873 celdas$$

Si se busca la optimización del coste del stack se analiza la condición de operación con la que se necesita menor número de celdas, en este caso, examinando los resultados obtenidos, se llega a la conclusión que para un voltaje de 0,65 V el menor número de celdas es 547 y se obtiene para la estequiometría del cátodo $\lambda = 1.5$. Seguido de este, se obtienen 587 celdas necesarias para una estequiometría de $\lambda = 2.0$; el mayor número de celdas necesarias (873) es el de la curva de polarización con una estequiometría del cátodo $\lambda = 3.5$.

Normalmente, se obtiene un buen rendimiento a bajas densidades de corrientes para las estequiometrías más pequeñas, como es el caso para $\lambda = 1.3$, aunque conforme aumenta la densidad de corriente se observa una caída más rápida en el voltaje. Esto puede deberse a que para bajas estequiometrías disminuye la concentración de oxígeno y aumenta la cantidad de agua en la membrana y en la capa de difusión de gases, lo que implica una penalización en el rendimiento de la celda debido a la falta de capacidad para eliminar el agua y a la falta de oxígeno en el cátodo.

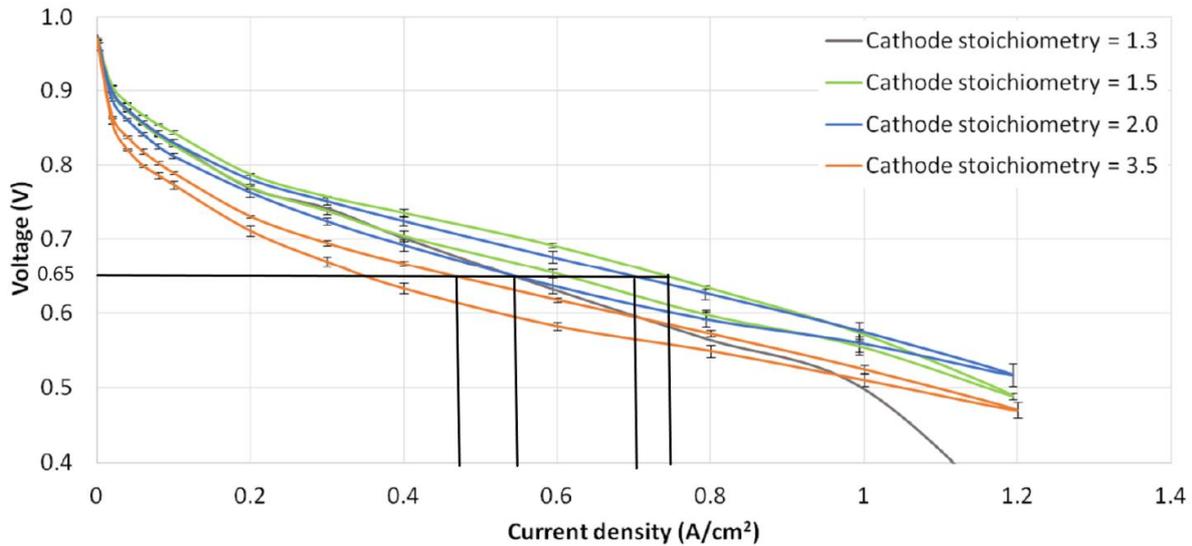


Ilustración 48: Curvas de polarización para las diferentes pruebas de estequiometría del cátodo [53].

Las conclusiones finales relacionadas con su influencia en los costes para un aumento de la estequiometría del cátodo son las siguientes:

- Disminuye la cantidad de agua en la membrana. Este hecho provoca un menor rendimiento de la celda, ya que disminuye la conductividad eléctrica y aumentan las pérdidas óhmicas. En lo referente a los costes, pasa lo contrario que ocurriría con el aumento de la presión de operación, en este caso se tendrá que invertir mayor cantidad de dinero en materiales encargados de transportar electricidad, para obtener materiales con mejor conductividad eléctrica.
- Disminuye pérdidas por activación. Se repite lo mismo que con un aumento en la temperatura o en la presión de operación, aumenta la densidad de corriente. A nivel de costes, como ya se ha comentado, este aumento de potencia podría implicar una necesidad menor de cantidad de platino en el catalizador o una disminución del número de celdas del stack, lo que reduce el coste final del stack.
- Disminuye pérdidas por corrientes parásitas. Se llaman corrientes parásitas a la energía consumida por el compresor de aire, el expansor o el motor. Aumentar la estequiometría del cátodo provoca un menor caudal de aire necesario, que tiene la ventaja adicional de reducir el consumo eléctrico del compresor y por tanto sus costes.

A partir de la estimación del coste unitario de cada celda ($4,061 \frac{\$}{\text{celda}}$), cuyas hipótesis se justifican en el apartado anterior, se ilustra el cambio en el coste del stack que supondría la variación de la estequiometría del cátodo:

➤ $\lambda = 1.3$

$$N^{\circ} \text{celdas} = \frac{P_{\text{stack}}}{P_{\text{elec}}} = \frac{80.000 \text{ W}}{111,15 \text{ W}} = 719,75 = 720 \text{ celdas}$$

$$C_{\text{stack}}(\lambda = 1.3) = N^{\circ} \text{celdas} \cdot C_{\text{celda}} = 720 \text{ celdas} \cdot 4,061 \frac{\$}{\text{celda}} = 2.923,92 \$$$

➤ $\lambda = 1.5$

$$N^{\circ} \text{celdas} = \frac{P_{\text{stack}}}{P_{\text{elec}}} = \frac{80.000 \text{ W}}{146,25 \text{ W}} = 547 \text{ celdas}$$

$$C_{\text{stack}}(\lambda = 1.5) = N^{\circ} \text{celdas} \cdot C_{\text{celda}} = 547 \text{ celdas} \cdot 4,061 \frac{\$}{\text{celda}} = 2.221,37 \$$$

➤ $\lambda = 2.0$

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{136,5 W} = 586,1 = 587 celdas$$

$$C_{stack}(\lambda = 2.0) = N^{\circ}celdas \cdot C_{celda} = 587 celdas \cdot 4,061 \frac{\$}{celda} = 2.383,81 \$$$

➤ $\lambda = 3.5$

$$N^{\circ}celdas = \frac{P_{stack}}{P_{elec}} = \frac{80.000 W}{91,65 W} = 872,89 = 873 celdas$$

$$C_{stack}(\lambda = 3.5) = N^{\circ}celdas \cdot C_{celda} = 873 celdas \cdot 4,061 \frac{\$}{celda} = 3.545,25 \$$$

Para una estequiometría del cátodo de $\lambda = 1.5$ se obtiene el menor coste del stack (2.221,37 \$), mientras que el mayor coste del stack (3.545,25 \$) se consigue para una estequiometría del cátodo de $\lambda = 3.5$. Generalmente, menores estequiometrías suelen suponer un aumento en el rendimiento de la celda, sin embargo, tienen el efecto contrapuesto de que en estequiometrías bajas ocurren mayores oscilaciones de voltaje, por ello, para la estequiometría del cátodo $\lambda = 1.3$ resulta un coste mayor (2.923,92 \$) que para el valor $\lambda = 1.5$.

3.4 Estudio de sensibilidad de una única variable.

La importancia de un análisis de sensibilidad erradica en comprobar la robustez de una valoración, para ello, se examinan los resultados y la influencia que tienen sobre ellos cambios en la metodología o los modelos empleados.

Un método de análisis utilizado para realizar estimaciones cuando existen parámetros que tienen cierto grado de variabilidad se llama el análisis de Montecarlo, que mediante una simulación matemática compleja obtiene unos resultados aproximados de cálculos que no tienen una solución exacta [57].

En la literatura actual existen diversos trabajos que emplean este método, se analiza uno de ellos [50], en el que realiza un estudio de sensibilidad empleando el método de Montecarlo para una única variable, que sirven para evaluar que parámetros afectan más al coste total del sistema de un automóvil e identificar parámetros claves donde se pueden reducir costes en un futuro [50].

Los parámetros evaluados con su valor base, su valor mínimo y su valor máximo se muestran en la tabla 7, se debe mencionar que este estudio se realizó para el supuesto caso de que se fabricasen 500.000 sistemas al año.

Tabla 7: Estudio de sensibilidad para valores de los parámetros de un automóvil (2018)[50].

Parameter	Units	Min Param. Value	Base Value	Max Param. Value
Pt Loading (manufacturing variation)	mgPt/cm ²	0.124	0.125	0.126
Membrane Humidifier Cost	\$/system	\$43.34	\$57.79	\$86.68
Q/ΔT Constraint	kW/°C	1.35	1.45	1.55
ePTFE Cost	\$/m ²	\$2.90	\$5.81	\$9.87
Bipolar Plate Welding Speed	m/min	2.5	7.5	7.5
Power Density	mW/cm ²	1128	1183	1238
Active to Total Area Ratio		0.55	0.625	0.80
Ionomer Cost	\$/kg	\$64.21	\$107.02	\$469.89
Bipolar Plate Cost	\$/kW _{net}	\$4.11	\$4.89	\$6.01
GDL Cost	\$/m ²	\$2.82	\$5.65	\$15.04
Hydrogen Recirculation System Cost	\$/system	\$207.22	\$207.22	\$501.46
Air Stoichiometry		1.3	1.5	2.0
Air Loop Cost (including CEM)	\$/system	\$536	\$848	\$1,222
2018 Auto System Cost (\$/kWnet)			\$44.58	

Estos resultados del estudio de sensibilidad se muestran de una manera más visual en el diagrama de tornado de la ilustración 49, en la que se observa que el parámetro que más afecta al coste del sistema es el coste del circuito de aire perteneciente al balance de planta del sistema. Este coste puede llegar a suponer una disminución del coste del sistema aproximado de hasta 6 \$/kW sobre el valor base (44,58 \$/kW) para el valor mínimo del parámetro (536 \$/sistema) o un aumento del coste aproximado de 6,5 \$/kW sobre el valor base para el máximo valor de este parámetro empleado en el estudio (1.222 \$/sistema). Este coste del circuito de aire tiene en cuenta el conjunto compresor/expansor/motor (CEM) con sus respectivos costes eléctricos y eficiencias.

Seguido del circuito de aire se encuentra la variación de costes que supone un cambio en la estequiometría del aire, como se observa en el diagrama una estequiometría del aire $\lambda = 2$ supondría un aumento aproximado del coste del sistema de hasta 4,5 \$/kW con respecto al precio base del sistema (44,58\$/kW). Mientras que para el valor mínimo de la estequiometría del aire evaluado en el estudio (1,3), disminuye aproximadamente 1,5 \$/kW del precio base del sistema.

El coste del circuito de recirculación de hidrógeno es el tercer parámetro que tiene mayor impacto en el coste del sistema, ya que para su máximo valor analizado (501,46 \$/sistema) aumenta hasta 4,5 \$/kW desde el valor base.

Se observa que el cambio en la carga de platino, parámetro que afecta directamente a la densidad de potencia, no tiene tanta relevancia en la variación del coste del sistema ($\sim \Delta 1\$/kW$). La variación de los costes de las capas de difusión de gases (GDL), las placas bipolares y los ionómeros tienen ligeramente mayor importancia ($\sim \Delta 2\$/kW$) en el coste total del sistema según el diagrama.

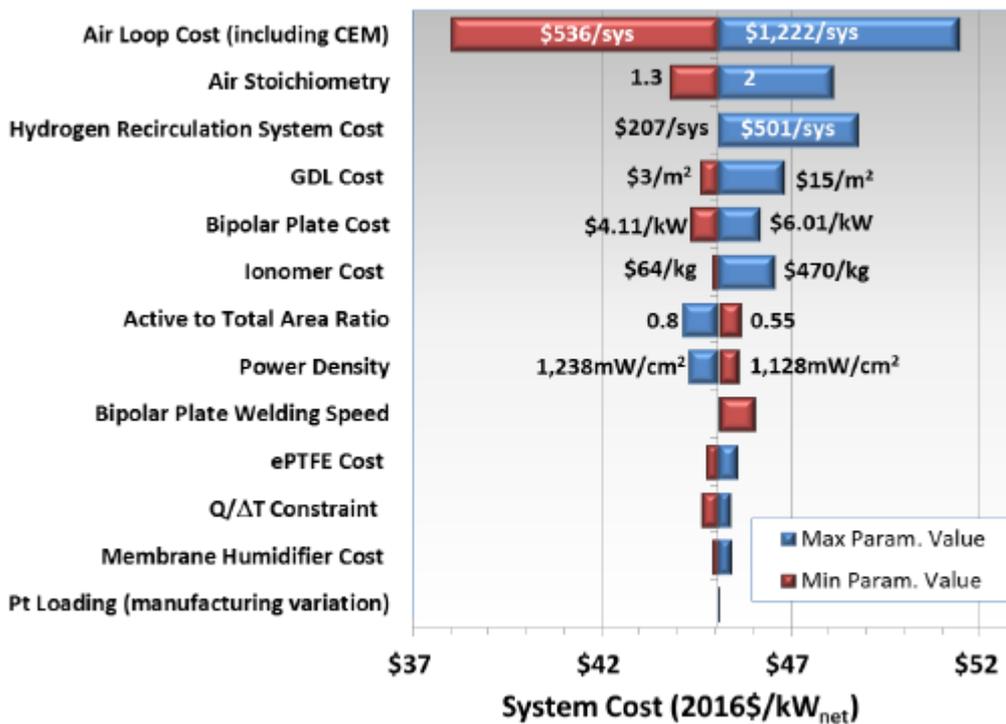


Ilustración 49: Diagrama de tornado del coste del sistema de un automóvil [50].

Este estudio del análisis de sensibilidad realizado para cada variable va en consonancia con lo visto en apartados anteriores, donde se desglosaban los costes del sistema de una pila de combustible. Se llega a la misma conclusión que se trata de buscar nuevos diseños de la unidad CEM y otros métodos de fabricación para poder disminuir el coste del circuito de aire; junto con la necesidad de mejorar el flujo del aire a través del sistema para poder reducir la estequiometría del mismo.

4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han analizado los sistemas de propulsión para automoción basados en pilas de combustible y se han evaluado sus costes. Del desarrollo de este son varias las conclusiones que se pueden obtener en relación a la implementación de las pilas de combustible de hidrógeno en el sector de la automoción.

Como se ha podido ver a lo largo de este trabajo, las pilas de combustible son viables comercialmente en los rangos de potencia adecuados para la automoción, y los fabricantes cada vez garantizan mejores prestaciones y mayor durabilidad, sin embargo, la mayor limitación que presenta a día de hoy es fundamentalmente el coste. Que la utilización del hidrógeno en los vehículos basados en las pilas de combustible sea una alternativa competitiva económicamente, depende de cómo evolucionen los costes del stack y del sistema de la pila de combustible y de la implementación de la infraestructura necesaria para su uso.

La pila de combustible ha experimentado reducciones de costes considerables durante la última década, pero los volúmenes de producción son bajos y los costes siguen siendo elevados. Mediante una maduración de esta tecnología, que incluye mejoras en el proceso de elaboración, aumento del número de unidades fabricadas y avances tecnológicos, se busca la manera de reducir el coste total del stack y de los componentes del balance de planta. Por ejemplo, mediante economías de escala, si el número de sistemas de pilas de combustible fabricados aumentase de 1.000 a 100.000 unidades al año se reduciría el coste del sistema en torno a un 65% llegando hasta un valor aproximado de 50\$/kW.

Analizando los datos obtenidos en el proyecto, se llega a la conclusión que los componentes que más afectan al coste total del sistema y, por tanto, los más prioritarios a la hora de investigar una reducción de costes asociados a ellos son el circuito del aire y del refrigerante dentro del balance de planta y el coste de la membrana, el catalizador y las placas bipolares dentro del stack. El Departamento de Energía de Estados Unidos plantea un objetivo final de llegar a un coste del sistema de 30 \$/kW, actualmente, según se ha visualizado en el análisis de proyección de costes, se estima el coste del sistema en torno a 46,16 \$/kW para un volumen de fabricación de 500.000 sistemas al año. Por tanto, anualmente se proponen una serie de mejoras en los sistemas de combustible como, por ejemplo, buscar alternativas viables para sustituir materiales como el platino del catalizador o el acero inoxidable de las placas bipolares que encarecen el coste total del sistema.

Debido a la fase tan prematura en la que se encuentra la infraestructura actualmente, existe una tensión entre el alto coste del hidrógeno, la baja demanda actual y la incertidumbre acerca del tamaño de las hidrogeneras que se oponen al progreso del hidrógeno como combustible para el transporte.

En este proyecto, se han empleado curvas de polarización experimentales disponibles en la literatura para hacer un estudio de cómo afectan las condiciones de operación a los costes del stack y del sistema de la pila de combustible, calculando el número de celdas de combustible necesario para cada condición de operación y concluyendo cuáles son los parámetros que optimizan este coste.

En relación a la temperatura, se observa que un aumento de 15°C de la temperatura de operación (70°C → 85°C) supone una reducción estimada de 231,48 \$ del coste del stack. Este hecho confirma que la temperatura de operación que optimiza los costes del sistema tiene que ser la máxima posible, teniendo en cuenta que una temperatura excesiva seca la membrana reduciendo drásticamente su conductividad y por tanto sus prestaciones, además de acelerar la degradación de la misma.

Con respecto a la presión de operación, no se puede decir que el aumento de la presión del ánodo y del cátodo supongan siempre una reducción del coste del stack. Porque a pesar de que, para un aumento de la presión del ánodo de 30 kPa y un aumento de la presión del cátodo de 50 kPa se reduzca considerablemente el coste del stack (-2.542,19\$) con respecto a la segunda prueba ($P_{ánodo} = 190\text{kPa}$ y $P_{cátodo} = 190\text{kPa}$), en el caso en el que se ha aumentado la presión del ánodo hasta 250kPa y la presión del cátodo hasta 230kPa ha provocado un ligero aumento del coste del stack de 203,05 \$ con respecto al coste del stack de la segunda prueba. Como se ha comentado previamente, el motivo más probable de ello sea el mayor gradiente de presión entre el ánodo y el cátodo de la tercera prueba.

Por último, se ha analizado como afecta una variación en la estequiometría del cátodo. Para una estequiometría del cátodo de $\lambda = 1.5$ se obtiene el menor coste del stack (2.221,37 \$), mientras que el mayor coste del stack (3.545,25 \$) se consigue para una estequiometría del cátodo de $\lambda = 3.5$. Generalmente, valores bajos de la

estequiometría del cátodo suelen suponer un aumento en el rendimiento de la celda, sin embargo, no pueden ser valores muy bajos ya que disminuiría la concentración de oxígeno y aumentaría la cantidad de agua en la membrana siendo más difícil su evacuación, por ello, para la estequiometría del cátodo $\lambda = 1.3$ resulta un coste mayor (2.923,92 \$) que para el valor $\lambda = 1.5$.

A pesar de que el coste total de propiedad de los vehículos basados en pilas de combustible sea el más elevado, cabe destacar que tienen un gran margen de mejora para reducir estos costes. Se prevé que, con la futura disminución del coste total de propiedad de estos vehículos, tengan su hueco en el sector de la automoción como una alternativa compatible con el medio ambiente debido a la ausencia de emisiones contaminantes. Características como una mayor autonomía, un menor tiempo de llenado del combustible y una mayor densidad energética en comparación con los vehículos eléctricos, lo convierten en el vehículo idóneo para automóviles pesados como autobuses o camiones.

5 REFERENCIAS

- [1] WebElements, “WebElements Periodic Table» Hydrogen» the essentials.” <https://www.webelements.com/hydrogen/> (accessed Apr. 25, 2021).
- [2] R. R. Salem, “Theory of the electrolysis of water,” *Prot. Met.*, vol. 44, no. 2, pp. 120–125, 2008, doi: 10.1007/s11124-008-2002-x.
- [3] Suddhasatwa Basu, *Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology*. Springer, New York, NY, 2007.
- [4] J. Emsley, *Nature’s building blocks : an A-Z guide to the elements*. Oxford: Oxford University Press, 2001.
- [5] T. N. Veziroglu and F. Barbir, “Hydrogen: the wonder fuel,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 17, no. 6, pp. 391–404, 1992, doi: 10.1016/0360-3199(92)90183-W.
- [6] The National Academies, *The Competitive Status of the U.S. Auto Industry*. 1982.
- [7] R. von Helmolt and U. Eberle, “Fuel cell vehicles: Status 2007,” *J. Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 833–843, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.12.073.
- [8] Toyota, “Outline of the Mirai Key Specifications,” *Toyota Mot. Corp.*, no. November, p. 13, 2014, [Online]. Available: <http://newsroom.toyota.co.jp/en/download/4224903>.
- [9] “Mercedes abandona el proyecto del GLC F-Cell de hidrógeno, un SUV tan complejo como interesante - Actualidad - Híbridos y Eléctricos | Coches eléctricos, híbridos enchufables.” <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/mercedes-cesa-produccion-glc-fcell-hidrogeno/20200423100631034665.html> (accessed Jun. 22, 2021).
- [10] H. M. Club, “Hyundai Motor Group Homepage.” <https://www.hyundaimotorgroup.com/Index.hub> (accessed Apr. 26, 2021).
- [11] “BMW i Hydrogen NEXT: Características, precio y test de conducción.” <https://www.caranddriver.com/es/coches/novedades/a28981604/bmw-i-hydrogen-next/> (accessed Jun. 22, 2021).
- [12] L. Gutiérrez Jodra, “EL HIDRÓGENO, COMBUSTIBLE DEL FUTURO,” *Real Acad. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 99, pp. 49–67, 2005.
- [13] S. Delgado Fernández, “Trabajo Fin de Máster Máster en Ingeniería Industrial Estudio de viabilidad acerca del uso de un sistema de almacenamiento basado en hidrogeno como alternativa al almacenamiento en batería de una instalación fotovoltaica aislada para abastecer a una vivie,” 2018.
- [14] R. Eriksen, “Energy Transition Outlook 2020 Executive Summary,” p. 36, 2020.
- [15] IEA, “World Energy Outlook 2020 – Analysis - IEA.” <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> (accessed Apr. 27, 2021).
- [16] IEA, “Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020 – Analysis,” 2 Marzo, 2021. <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020> (accessed Apr. 28, 2021).
- [17] R. Fernández-Reyes, “El Acuerdo de París y el cambio transformacional,” *Papeles Relac. ecosociales y cambio Glob.*, vol. 132, pp. 101–114, 2016.
- [18] L. Martín Murillo, J. Rivera Alejo, and R. Castizo Robles, “CAMBIO CLIMÁTICO Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Informe La Rábida, Huelva,” 2018. Accessed: Apr. 29, 2021. [Online]. Available: www.observatoriolarabida.com.
- [19] Comisión Europea, “Acuerdo de París | Acción por el Clima.” https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es#tab-0-0 (accessed Apr. 29, 2021).
- [20] Gobierno de España, “Principales elementos del Acuerdo de París.” <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el->

- cambio-climatico/naciones-unidas/elementos-acuerdo-paris.aspx (accessed Apr. 29, 2021).
- [21] Comisión Europea, “Estrategia a largo plazo para 2050 | Acción por el Clima.” https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_es (accessed Apr. 29, 2021).
- [22] IEA, “Spain - Countries & Regions - IEA.” <https://www.iea.org/countries/spain> (accessed Apr. 29, 2021).
- [23] Gobierno de España, “Hoja de Ruta del Hidrógeno.”
- [24] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH), *Hydrogen Roadmap Europe*. 2019.
- [25] IEA, “World Energy Outlook 2020 – Analysis - IEA,” 2020. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020?mode=overview> (accessed Jun. 01, 2021).
- [26] IEA, “The Future of Hydrogen,” *Futur. Hydrog.*, no. June, 2019, doi: 10.1787/1e0514c4-en.
- [27] Deloitte China, “Fueling the Future of Mobility - Hydrogen and fuel cell solutions for transportation,” *Financ. Advis.*, vol. 1, p. Volume 1, 2020, [Online]. Available: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>.
- [28] Ingemecánica, “Pilas de Combustible.” <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn115.html> (accessed Jun. 25, 2021).
- [29] G. Correa, E. Moschen, and P. Muñoz, “Modelado de un Vehículo Eléctrico de Pilas de Combustible. Dimensionamiento, Análisis Económico y de Factibilidad,” *Rev. Tecnol. y Cienc.*, vol. 25, pp. 30–38, 2014.
- [30] “FCEV: Vehículo Eléctrico de Pila de Combustible de Hidrógeno - La Comunidad del Taller,” 2019. <https://www.lacomunidadeltaller.es/fcev-vehiculo-electrico-de-pila-de-combustible-de-hidrogeno/> (accessed Jun. 25, 2021).
- [31] Toyota, “Configurador Toyota Mirai | Toyota España.” <https://www.toyota.es/coches/mirai/build?path=engine/ded7608c-09b2-4746-b8cc-6550859538cd/74469257-47ae-46eb-859d-2c693e6726ca/0fed881c-20f0-4b36-8965-727af6df7abd> (accessed Jun. 26, 2021).
- [32] L. Xu, P. Hong, C. Fang, J. Li, M. Ouyang, and W. Lehnert, “Interactions between a polymer electrolyte membrane fuel cell and boost converter utilizing a multiscale model,” 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.05.065.
- [33] S. de prensa Toyota, “Nuevo Toyota Mirai: así se presenta la segunda generación de la berlina de pila de combustible de Toyota.” <https://prensa.toyota.es/nuevo-toyota-mirai-asi-se-presenta-la-segunda-generacion-de-la-berlina-de-pila-de-combustible-de-toyota/> (accessed Jun. 26, 2021).
- [34] MOTOR K, “Hyundai NEXO eléctrico 2021 pila combustible de HIDRÓGENO FCEV REVISIÓN y PRUEBA en español.” https://www.youtube.com/watch?v=gVGUefRmzvQ&t=932s&ab_channel=MOTORK (accessed Jul. 11, 2021).
- [35] DGT, “¿Qué es la pila de hidrógeno?” <https://revista.dgt.es/es/motor/noticias/2021/04ABRIL/0408-Electroescuela-Hidrogeno.shtml> (accessed Jul. 11, 2021).
- [36] Department of Energy, “Fuel Cell Systems | Department of Energy.” <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-systems> (accessed Jun. 28, 2021).
- [37] “Pin en PEM Fuel Cells.” <https://www.pinterest.es/pin/480337116478162303/?d=t&mt=login> (accessed Jun. 28, 2021).
- [38] A. Hermann, T. Chaudhuri, and P. Spagnol, “Bipolar plates for PEM fuel cells: A review,” in *International Journal of Hydrogen Energy*, Sep. 2005, vol. 30, no. 12, pp. 1297–1302, doi: 10.1016/j.ijhydene.2005.04.016.
- [39] J. Corominas, “Pilas de combustible,” *Alambique Didáctica las ciencias Exp.*, vol. 102, no. 27, pp. 115–

- 118, 2001.
- [40] “Types of Fuel Cells | Department of Energy.” <https://www.energy.gov/index.php/eere/fuelcells/types-fuel-cells> (accessed Apr. 22, 2021).
- [41] Department of Energy, “Comparison of Fuel Cell Technologies | Department of Energy.” <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies> (accessed Jun. 28, 2021).
- [42] Department of Energy, “Types of Fuel Cells | Department of Energy.” <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells> (accessed Jun. 28, 2021).
- [43] T. F. Cells, F. Cell, T. Office, F. Cells, T. Office, and T. F. Cells, “Fuel Cell 2016 Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan,” vol. 2015, pp. 1–58, 2016.
- [44] S. T. Thompson *et al.*, “Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook,” *J. Power Sources*, vol. 399, no. August, pp. 304–313, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.07.100.
- [45] B. James, “2018 Cost Projections of PEM Fuel Cell Systems for Automobiles and Medium-Duty Vehicles,” *Fuel Cell Technol. Off. Webinar 25.04.18*, pp. 1–44, 2018, [Online]. Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/04/f51/fcto_webinarslides_2018_costs_pem_fc_autos_trucks_042518.pdf.
- [46] Battelle Memorial Institute, “Manufacturing Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for 5- and 10-kW Backup Power Applications,” *U.S. Dep. Energy*, no. October, p. 124, 2016.
- [47] Department of Energy, “DOE Hydrogen and Fuel Cell Technologies Program Record: On-Road Fuel Cell Stack Durability,” *Doe, Us*, 2016, [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>.
- [48] G. Kleen and E. Padgett, “DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record: Durability-Adjusted Fuel Cell System Cost,” no. Dm, pp. 1–6, 2021, [Online]. Available: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9014_hydrogen_storage_materials.pdf.
- [49] J. Marcinkoski, J. Spendelow, A. Wilson, and D. Papageorgopoulos, “DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record - Fuel Cell System Cost - 2017,” *J. Mech. Robot.*, vol. 9, no. 4, pp. 1–9, 2017, [Online]. Available: <http://mechanismsrobotics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4036738>.
- [50] B. D. James, J. M. Moton, and W. G. Colella, “Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update,” *ASME 2014 12th Int. Conf. Fuel Cell Sci. Eng. Technol. collocated with ASME 2014 8th Int. Conf. Energy Sustain.*, no. January, p. V001T07A002–V001T07A002, 2019.
- [51] IEA, “The Future of Hydrogen – Analysis - IEA.” <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (accessed Jul. 09, 2021).
- [52] Deloitte China and Ballard, “Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation,” *Financ. Advis.*, vol. 1, p. Volume 1, 2019, [Online]. Available: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>.
- [53] A. Ramírez-Cruzado, B. Ramírez-Peña, R. Vélez-García, A. Iranzo, and J. Guerra, “Experimental analysis of the performance and load cycling of a polymer electrolyte membrane fuel cell,” *Processes*, vol. 8, no. 5, 2020, doi: 10.3390/PR8050608.
- [54] G. Tsotridis, A. Pilenga, G. De Marco, and T. Malkow, “EU harmonised test protocols for PEMFC MEA testing in single cell configuration for automotive applications,” vol. 27632, 2015.
- [55] F. Barbir, *PEM fuel cells: theory and practice, second edition*, 2nd ed. Waltham, Mass: Academic Press, 2013.
- [56] J. A. Salva Aguirre, “Modelo y validación experimental de una monocelda y un stack de una pila de comsbutible tipo PEM,” 2015.

- [57] ITM Platform, “Análisis de Montecarlo en gestión de proyectos,” 2016. <https://www.itmplatform.com/es/blog/analisis-de-montecarlo-en-gestion-de-proyectos/> (accessed Jul. 11, 2021).