



FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES
(ICADE)

LA PILA DE HIDRÓGENO: LA OPORTUNIDAD QUE EUROPA ESTÁ PERDIENDO

Autor: Clara Palacios García

Director: Carlos Martínez de Ibarreta Zorita

MADRID | Junio 2020

RESUMEN

Este trabajo pretende demostrar la viabilidad de apostar por el motor de pila de hidrógeno en Europa y las ventajas que presenta frente al modelo de movilidad que se está promoviendo desde las instituciones europeas, basado en la electrificación del sector. La inversión que se está dedicando a su desarrollo es insuficiente, y en estas circunstancias es muy improbable que tenga lugar la transición a un modelo energético basado en la tecnología de hidrógeno. El análisis profundiza tanto en aspectos técnicos como económicos para comparar ambos modelos, y presenta también las ventajas de diseños híbridos. La transición energética es fundamental para garantizar no solo la sostenibilidad del sistema, sino la seguridad energética en Europa.

Palabras clave: movilidad sostenible, transición energética, pila de hidrógeno, economía de hidrógeno, vehículo eléctrico, seguridad energética, vehículo híbrido, sustitución tecnológica, estudio de viabilidad.

ABSTRACT

This paper aims to demonstrate the viability of betting for the hydrogen cell engine in Europe and its advantages against the mobility model promoted from European institutions, based on the electrification of the sector. The investment dedicated is insufficient, and in these circumstances, it is unlikely that the transition towards an energetic model based on hydrogen technology takes place soon. The analysis delves into both technical and economic aspects to compare both models and presents the advantages of hybrid designs. The energetic transition is a fundamental phenomenon to guarantee not only sustainability but also energy security in Europe.

Key words: sustainable mobility, energetic transition, hydrogen fuel cell, hydrogen economy, electric vehicle, energetic security, hybrid vehicle, technological substitution, viability study.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Relevancia.....	2
1.2. Objetivos del trabajo.....	2
1.3. Metodología.....	3
1.4. Organización del trabajo.....	4
1.5. Estado de la cuestión.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Situación en Europa.....	9
2.1.1 Cambios en la movilidad.....	10
2.1.2 Emisiones del transporte.....	11
2.1.3 Regulación de emisiones.....	12
2.1.4 La UE promueve el eléctrico.....	13
2.1.5 Situación en el mercado.....	14
2.2 Sustitución tecnológica.....	15
3. ANÁLISIS COMPARATIVO.....	20
3.1 Vehículo eléctrico.....	21
3.1.1 Revisión técnica.....	23
3.1.2 Infraestructura.....	24
3.1.3 Modelos más vendidos.....	24
3.1.4 Desarrollo de baterías.....	26
3.1.5 Estudio de costes.....	27
3.2 Vehículo de pila de hidrógeno.....	28
3.2.1 Revisión técnica.....	31
3.2.2 Almacenaje y transporte.....	32
3.2.3 Modelos en el mercado.....	33
3.2.4 Métodos de producción.....	33
3.2.5 Uso como aditivo.....	35
3.2.6 Estudio de costes.....	37
3.2.7 Modelos híbridos.....	40
3.3 Análisis y comparación.....	40
3.3.1 Emisiones.....	40
3.3.2 Técnica.....	41
3.3.3 Costes.....	42
4. UTILIDADES ALTERNATIVAS DEL HIDRÓGENO.....	44
4.1 Maquinaria pesada.....	44
4.2 Transición ecológica y seguridad energética.....	46
4.3 Mejora de eficiencia de la red eléctrica.....	47
5. CONCLUSIONES.....	49
6. BIBLIOGRAFÍA	52

1. INTRODUCCIÓN

La transición energética es uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta la comunidad internacional en los últimos años. El cambio climático tiene repercusiones económicas directas a nivel mundial, al aumentar la frecuencia de fenómenos extremos. En este contexto, es evidente la necesidad de reformar el sistema energético para garantizar su sostenibilidad ante la creciente demanda global y la destrucción de recursos que está teniendo lugar.

La comunidad internacional se comprometió a reducir las emisiones para 2030 en el Acuerdo de París (2015), pero son muy pocos los países que están cumpliendo con los objetivos fijados. La IEA (2020) dispone de una serie de indicadores para medir el progreso, y alerta de que, lejos de reducirse, las emisiones globales están aumentando en los últimos años. Utilizar fuentes de energía renovables es imprescindible para reducir las emisiones, y Europa tiene la oportunidad de liderar la reconfiguración del sector energético. Además, disponer de energías renovables aumenta la independencia económica de los países, lo cual tiene importantes repercusiones políticas.

Por su gran impacto medioambiental, la movilidad debe desempeñar un papel fundamental en la transición energética. En la Unión Europea se están coordinando medidas para promover la renovación de vehículos y aumentar la cuota de vehículos eléctricos de batería. Desde hace años, se están introduciendo incentivos, tanto a nivel europeo como nacional, mediante la financiación tanto de los vehículos como de la instalación de estaciones de carga.

Por el contrario, gobiernos asiáticos, especialmente el japonés, están apostando por vehículos de pila de hidrógeno. Consideran que ofrece ventajas frente a los eléctricos, especialmente porque el repostaje es similar al del motor de combustión interna. Y es que son muchos los expertos que defienden la superioridad del hidrógeno, pero existe división en la comunidad internacional y no está claro qué tecnología se impondrá finalmente.

Cualquiera de las dos tecnologías requeriría una importante inversión en infraestructura para que se abastezca un sistema global. Los avances tecnológicos están mejorando la eficiencia de los vehículos y ampliando las capacidades para que se produzca una transformación en el sector, pero el principal obstáculo es el alto coste que conllevaría adaptar la infraestructura, ya que es necesaria una gran inversión tanto pública como privada para cambiar el modelo energético mundial (Financial Times, 2018).

1.1 – Relevancia

El sector energético es una de las bases de toda economía, fundamental para que cualquier empresa pueda desarrollar su actividad. Es de vital importancia conocer la evolución de la industria energética, ya que influye directamente en prácticamente todos demás los sectores, especialmente a la hora de gestionar una compañía.

En particular, la movilidad es un factor fundamental para la vida moderna en Europa, y está sufriendo grandes cambios en los últimos años con el objetivo de desarrollar ciudades cómodas. Los ciudadanos demandan alternativas eficientes adaptadas a sus necesidades, lo que está promoviendo la introducción de nuevas tecnologías y tendencias como la conducción autónoma, que será una realidad en pocos años. Pero es especialmente relevante la preocupación generalizada por el impacto medioambiental que tiene el transporte, lo que está favoreciendo la introducción de alternativas sin emisiones. Es muy posible que esta sea la clave del futuro tanto del sector del transporte como del energético.

Las mejoras en el transporte han permitido aumentar la capacidad comercial del sistema internacional, ampliando las posibilidades de los negocios para desarrollarse. Garantizar su sostenibilidad se torna fundamental para el desarrollo socioeconómico en las próximas décadas. Dada la inestabilidad del momento que vivimos, especialmente tras la crisis del COVID-19, son muchas las diferentes tendencias que luchan por introducir un cambio en el sector, que necesita renovarse.

La crisis sanitaria y el confinamiento en diferentes países han afectado gravemente a los fabricantes de automóvil, que han visto sus fábricas paralizadas y sus ventas caer en picado. Puede que esta sea una oportunidad para introducir nuevos modelos que cambien el estándar del sector, que es, además, muy dependiente del petróleo. Con energías renovables, se podría resolver esta desventaja y ganar en autonomía.

1.2 – Objetivos del trabajo

El presente trabajo de investigación se centra en analizar la transición que está sufriendo el modelo de movilidad en Europa, principalmente enfocado en promover la sostenibilidad, introduciendo alternativas a los combustibles fósiles. El trabajo se plantea desde la convicción de que establecer la economía del hidrógeno como modelo energético global, sería la solución más eficiente para resolver muchos de los retos a los que se enfrenta el sector del automóvil.

La Unión Europea está apostando claramente por impulsar la electrificación de la movilidad en los últimos años, en colaboración con gobiernos nacionales y locales, y los principales fabricantes. Sin embargo, las grandes potencias asiáticas confían más en el hidrógeno como combustible alternativo a los fósiles y están implantando planes ambiciosos para que se consolide en el mercado. También se trata de una batalla importante entre los grandes fabricantes de vehículos: los europeos están desarrollando modelos eléctricos, y los asiáticos, de pila de hidrógeno.

El principal objetivo de este trabajo es comparar ambas alternativas desde un punto de vista técnico y económico. A primera vista, la tecnología del motor de pila de hidrógeno parece superior al motor eléctrico, pero aún necesita mucha inversión en desarrollo para adaptarlo a las demandas del mercado. Para resolver este inconveniente, se considera la utilización de tecnologías híbridas, que pueden solventar muchos de los problemas que presentan ambos diseños, además de ofrecer más flexibilidad a los conductores.

Podemos encontrar modelos de ambas tecnologías disponibles para la compra, aunque los de pila de hidrógeno son mucho más limitados y difíciles de adquirir, ya que no se producen en Europa. El trabajo analiza algunos vehículos y compara su rendimiento y penetración en el mercado, que, en todo caso, es escasa, porque son más caros que los vehículos tradicionales con motores de combustión. Se consideran las posibilidades de desarrollar ambas alternativas y sus consecuencias, tratando de prever cuál se impondrá en el mercado. En cualquier caso, se encuentran en una etapa de desarrollo muy temprana.

Por último, se considera el impacto geopolítico y global que tendría un cambio tan radical en el sector. La transición hacia energías limpias es una gran oportunidad para resolver diversos problemas además de la reducción de emisiones de efecto invernadero, como la dependencia energética de fuentes fósiles, garantizar la calidad del aire en las ciudades o reducir el uso intensivo de la tierra que necesita el mantenimiento del actual modelo.

1.3 - Metodología

Para analizar la situación en profundidad, la elaboración de este trabajo ha requerido de la revisión de bibliografía relevante en diferentes ámbitos, todos ellos relacionados con la transformación que está sufriendo el modelo energético a nivel global. Se ha incidido principalmente en artículos académicos que comparasen las dos tecnologías e informes oficiales de instituciones europeas, que detallan las políticas que se están siguiendo para promover la transición energética.

Se han utilizado las fuentes más relevantes para el análisis, a través de herramientas como Google Scholar y la base de datos JSTOR, además de webs oficiales de la UE. La búsqueda se ha realizado introduciendo palabras clave específicas al caso y dando preferencia a documentos recientes, principalmente a partir de 2015.

Se han intentado combinar diferentes perspectivas para estudiar la viabilidad de una economía basada en el hidrógeno como combustible en los próximos años, y enfrentarla con el modelo eléctrico, tratando de llegar a previsiones realistas. Aunque aún queda mucho por desarrollar ambas tecnologías, las previsiones son alentadoras, y de continuar con lo planeado, Europa estaría en condiciones de alcanzar los objetivos marcados en cuanto a la renovación del sector hacia la sostenibilidad.

Este estudio tiene en cuenta propuestas híbridas, que combinan ventajas de las dos tecnologías y aumentan las posibilidades de los compradores. No existe mucha literatura en este sentido, pero las fuentes consultadas demuestran que tiene mucho potencial de mercado, no solo como una tecnología de transición, sino como estándar del sector.

1.4 - Organización del trabajo

Este trabajo se compone de tres partes principales. En la primera, se consideran los aspectos que definen la situación actual en Europa: los problemas relacionados con sector de la movilidad y la reacción institucional, mediante regulaciones y programas de promoción. También se incluye una revisión de los principales estudios acerca de la sustitución tecnológica. La segunda parte analiza en profundidad el desarrollo del motor eléctrico y de pila de hidrógeno, comparándolos y considerando soluciones efectivas a las principales desventajas que presentan para su estandarización.

Para terminar, se analizan las consecuencias que tendría un cambio de modelo en las relaciones internacionales, al aumentar la independencia energética de Europa.

1.5 - Estado de la cuestión

La industria automovilística se está enfrentando a uno de los momentos más inciertos de los últimos tiempos, ya que las preferencias del mercado están cambiando rápidamente a medida que surgen nuevos desafíos para la movilidad personal. Los conductores tienen en cuenta características como la comodidad al volante, especialmente en zonas urbanas, además de la seguridad o el consumo de combustible y las emisiones a la hora de comprar un vehículo, más allá de la calidad técnica que ofrezcan los fabricantes (PWC, 2020).

La concienciación en cuanto al impacto que la utilización de combustibles fósiles tiene en el planeta está creciendo en los últimos años, y todas las marcas ofrecen ya alternativas más respetuosas con el medio ambiente. Desde vehículos que utilizan biocombustibles, hidrógeno, eléctricos o híbridos, las alternativas al motor de combustión interna están creciendo y se espera que se sigan desarrollando en los próximos años (PWC, 2017).

El sector del transporte es la segunda industria que emite más gases de efecto invernadero a nivel global, después de la producción de energía y plásticos (EC, 2017), por lo que el sector lleva en el foco de los gobiernos europeos ya muchos años. Debido al interés en la reducción de la huella de carbono de los vehículos, están surgiendo nuevas iniciativas.

Las principales Organizaciones Internacionales han destacado la necesidad de cambiar el modelo de consumo a nivel global, que está sobreexplotando los recursos naturales y provocando el cambio climático. En la cumbre de París de 2015 (2015) se establecieron los objetivos 2030, entre los que se encuentra limitar la subida de temperatura global a 2°C, para lo que es imprescindible reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

Como se puede observar en el siguiente gráfico, las emisiones han crecido de forma constante en Europa durante los últimos años:

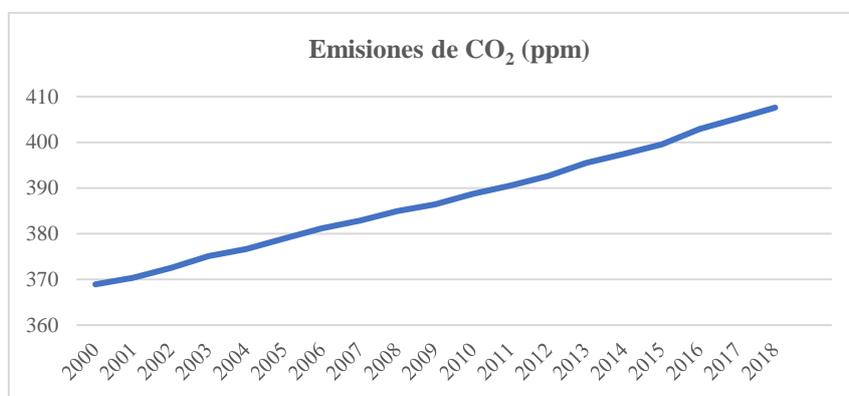


Fig. 1. Emisiones de CO₂ en la UE. Datos: (EEA, 2018)

Se ha producido un aumento del interés general acerca de la ralentización del cambio climático, la contaminación industrial y la necesidad de conservar el medio natural (Deloitte, 2020). Como consecuencia, las energías renovables cada vez adquieren más relevancia en Europa, mientras otras fuentes decrecen, como muestra el siguiente gráfico:

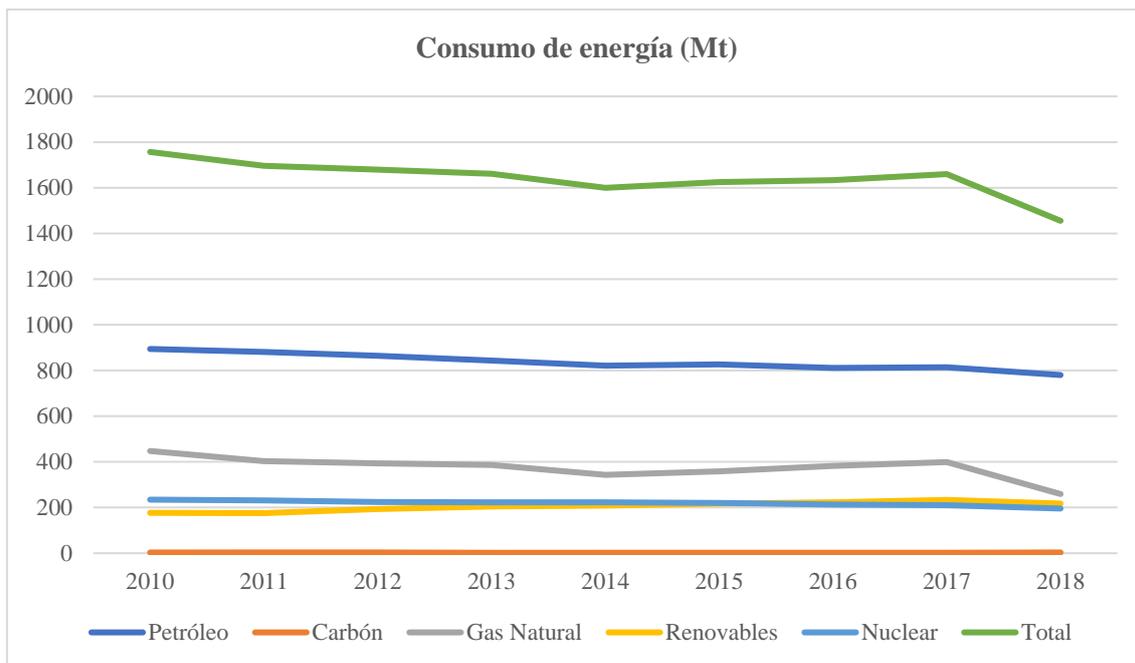


Fig. 2. Consumo de energía según fuentes en la UE. Datos: (Eurostat, 2018)

A pesar de que las energías renovables cada vez están más presentes en otros sectores, en la industria del transporte aún representan una parte muy pequeña, inferior a un 2%:

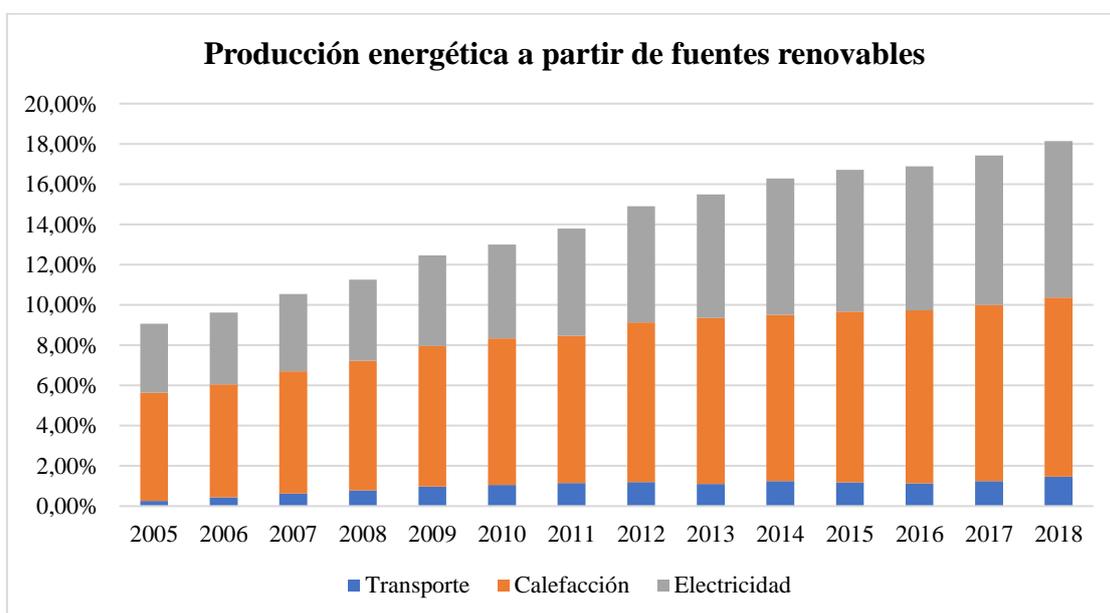


Fig. 3. Producción energética a partir de fuentes renovables en la UE. Datos: (EEA, 2018)

La Unión Europea ha fijado en un 40% el objetivo común en cuanto a emisiones (European Commission, 2019), lo cual sería imposible sin contar con el sector del transporte. Es necesario un cambio en el modelo energético para combatir el cambio climático, especialmente en una sociedad en la que cada vez la demanda es mayor. El

transporte personal necesita aumentar en eficiencia para satisfacer las necesidades de una sociedad cada vez más interdependiente y conectada. Pero esta eficiencia no se demanda exclusivamente a nivel técnico, sino también económico y ecológico.

La transición hacia un sistema más sostenible en el transporte se está apoyando en multitud de nuevas tendencias, opciones y modelos de negocio. Está teniendo lugar una revisión del modelo de movilidad personal especialmente en las ciudades. Las marcas están apostando por diferentes conceptos, y la opción que finalmente conquistará el sector en las próximas décadas aún no está definida.

No hay duda de que la técnica ha evolucionado lo suficiente para desarrollar alternativas más sostenibles a los hidrocarburos, pero todavía no podemos hablar de una opción claramente asentada, debido a diferentes inconvenientes, como que el coste de fabricación es más alto (European Commission, 2017). El principal obstáculo es la dependencia de otros sectores complementarios como los fabricantes de combustibles.

La industria automovilística depende en gran medida de otras industrias indirectas, que seguramente serán quienes determinen el ganador. En esta situación, el desarrollo de nuevas iniciativas que promuevan la sostenibilidad necesita apoyarse en la acción gubernamental, que establezca incentivos para este tipo de industrias (EC, 2017).

La contaminación es uno de los mayores problemas medioambientales que nos encontramos hoy en día, con ciudades cada vez más grandes y concurridas, y la gestión de este problema repercute directamente en la salud de los ciudadanos. En este contexto, parece que los gobiernos están apostando por promover el coche eléctrico en las ciudades, para además mejorar la calidad del aire que respiramos (European Commission, 2017).

Sin embargo, hay muchas alternativas viables que ya se están comercializando, y no está claro cuál ofrece características superiores para imponerse en el mercado en los próximos años. Fabricantes como General Motors, Mercedes-Benz o Volkswagen han presentado modelos eléctricos e híbridos en los últimos años, además de otras alternativas que utilizan biomasa (Demandt, 2019). Las principales marcas que están fabricando coches de hidrógeno son Toyota, Honda y Mitsubishi.

La transición hacia una “economía de hidrógeno” es especialmente atractiva para satisfacer las necesidades de los consumidores modernos, al mismo tiempo que se garantiza la sostenibilidad del sistema (H2 Mobility, 2015). Aún quedan por resolver

inconvenientes técnicos, pero el desarrollo está siendo rápido y pronto se podrán mejorar los modelos actuales.

El concepto de *Smart cities* (Iberdrola, 2017) ha ayudado a concienciar a la población sobre la importancia de introducir energías renovables, que serán la fuente principal de energía en unas décadas. Las instituciones deben ayudar fomentando la concienciación, promoviendo el desarrollo, con subsidios e inversiones.

En el presente documento se pretende estudiar las diferentes opciones disponibles en el mercado para promover la sostenibilidad en la industria automovilística, con especial énfasis en la comparación del vehículo eléctrico y el de hidrógeno. En los últimos años, los gobiernos occidentales han fomentado el uso del coche eléctrico frente al de hidrógeno, a pesar de que la comunidad científica lleva ya décadas alabando las grandes posibilidades que ofrece el segundo.

En definitiva, la incertidumbre, la variedad de opciones y la importancia de tomar las decisiones adecuadas, hace necesario realizar esta comparativa y analizar la cuestión desde una perspectiva amplia.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se desarrolla el marco conceptual en el que se va a sustentar el trabajo. Poniendo el foco en Europa, se estudia la situación de la industria automovilística específicamente en la Unión Europea, defendiendo la necesidad de reformar el modelo energético para garantizar su seguridad y sostenibilidad. El transporte es un pilar fundamental para el progreso de la sociedad europea, por lo que debe priorizarse la transición a energías renovables.

Las emisiones del transporte tienen graves consecuencias en el medioambiente y en la salud de la población, por lo que la concienciación está creciendo y se prevé un importante cambio en el modelo de movilidad en Europa. Se estudia también la evolución de las emisiones y la regulación común para promover su reducción.

Pero no se podrían cumplir con los objetivos fijados sin introducir nuevas tecnologías que utilicen energías renovables, por lo que se analiza el apoyo institucional que se está brindando a introducción del coche eléctrico a nivel europeo. Se está apostando claramente por la electrificación del transporte mediante incentivos económicos y fiscales, y las instituciones están invirtiendo directamente en la construcción de infraestructuras de carga de baterías.

A continuación, se analiza la situación en el mercado europeo y la aceptación que se está consiguiendo de diferentes alternativas. A pesar de la apuesta que ha hecho la UE por el coche eléctrico de batería, aún es muy poca la presencia que ha alcanzado en el mercado. El número de vehículos de pila de hidrógeno es muy pequeño, principalmente por la falta de inversión en infraestructuras.

Por último, se estudia el fenómeno de la sustitución tecnológica mediante la revisión de literatura relevante. El papel que juega el ecosistema es clave para que una tecnología se asiente en su mercado, especialmente en sectores que dependen de industrias indirectas.

2.1 Situación en Europa

El Proyecto europeo, centrado en crear riqueza para todos sus miembros, promover la paz y el Desarrollo sostenible hoy se enfrenta a innumerables retos. Uno de los más importantes es asegurar la continuidad y la estabilidad del Proyecto Europeo (Aiginger, 2016). Europa se enfrenta a diversos problemas socioeconómicos por la necesidad de garantizar la sostenibilidad y la igualdad social.

Los más desfavorecidos son los que más se exponen a los peligros que conlleva la contaminación y el cambio climático (EEA, 2015). Son necesarias reformas fundamentales en el sistema europeo, apostando por un modelo ambicioso que garantice la estabilidad y la sostenibilidad. Se están introduciendo reformas, y cada vez utiliza más energías renovables, pero sigue siendo muy dependiente de la importación de energía.

Debemos apostar por una transición a un modelo sólido, fiable, sostenible, rentable y seguro, para garantizar la seguridad energética de Europa. En este sentido, es necesario aumentar la proporción de energías renovables utilizadas a un ritmo mayor del previsto, y para esto todos los países miembros deben hacer un compromiso con el futuro, para salvar un sistema que se ve amenazado por la inestabilidad interna y externa a la que se está enfrentando en los últimos tiempos.

El transporte es una de las bases de nuestra sociedad, que ha permitido el rápido desarrollo socioeconómico que hemos visto en los últimos años. Sin embargo, el modelo actual tiene ciertas consecuencias que lo hacen insostenible. La contaminación que produce perjudica al medio ambiente y degrada la calidad del aire que respiramos, afectando gravemente a la salud de los ciudadanos. Según la EEA (2015), casi 88 millones de personas están expuestas a niveles de contaminación atmosférica por encima de los límites marcados. Para reducir el impacto del sector del transporte, Europa necesita una transición hacia una economía circular más sostenible y la descarbonización del sistema (EEA, 2019).

Aumentar la competencia en el sector del transporte para fomentar la innovación es imprescindible, por lo que las instituciones están apoyando iniciativas de investigación tanto públicas como privadas. Uno de los principales objetivos es promover la electrificación y la renovación de la flota (European Commission, 2017). Pero el vehículo eléctrico es solo una de las opciones que permiten alcanzar los objetivos propuestos en cuanto a eficiencia y bajas emisiones.

2.1.1 Cambios en la movilidad

Mitigar los efectos del cambio climático a través de una transición hacia un sistema energético sostenible es una de las prioridades globales de esta década. La comunidad internacional se ha comprometido a introducir reformas en varias ocasiones, incluyendo los *SDGs*, *Habitat III* y COP21, pero los esfuerzos actuales no son suficientes (EEA, 2019).

Las emisiones de los vehículos de carretera tienen un papel crucial en este aspecto, y los consumidores cada vez demuestran más concienciación por el transporte sostenible. Desarrollar vehículos sin emisiones, utilizando combustibles alternativos, ayudará a reducir el impacto medioambiental del sector, además de mejorar la calidad del aire, que tiene un grave impacto en la salud general de la población.

La política europea apoya la transición hacia la economía circular, más sostenible y menos contaminante. Las principales medidas incluyen promover la eficiencia energética y vehículos sin emisiones, apoyar mercados secundarios y de reciclaje, optimizar los sistemas de transporte locales y disminuir la dependencia del petróleo. Iniciativas para mejorar la tecnología y la renovación de la flota están mejorando la situación, pero aún queda mucho por hacer, dado que las emisiones del transporte son la principal fuente de gases de efecto invernadero en Europa (European Commission, 2019).

Hemos visto en Europa un aumento del uso de vehículos no motorizados y del transporte público, gracias a la concienciación de la población. Sin embargo, también es necesario resolver otros problemas como la congestión del tráfico, la seguridad o el uso intensivo del espacio que existen en este momento. Será necesario no solo desarrollar tecnologías alternativas, sino generar un cambio en el comportamiento de los usuarios para solventar estos problemas. Los cambios en el concepto de movilidad que tienen las nuevas generaciones provocarán una disminución del uso del coche, ya que alternativas como la economía colaborativa, el transporte público o vehículos urbanos como patinetes o bicicletas resuelven estos problemas y cada vez tienen mayor aceptación (EEA, 2015).

2.1.2 Emisiones del transporte

El transporte es aún responsable de un cuarto de las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa, y el transporte por carretera significa el 80%. En 2017, un 27% de las emisiones de gases de efecto invernadero provenían del sector del transporte, y 22% de transporte por tierra (EEA, 2019). Las emisiones habían aumentado un 2.2% respecto a 2016 y se situaban un 28% por encima de 1990. En 2018 disminuyeron un 0.7.

El sistema energético depende de combustibles fósiles en un 82%, mientras las renovables contribuyen un 17% de la electricidad consumida. Para 2050, se calcula que el crecimiento de la población aumentará la demanda de energía en un 16%, y que las renovables constituirán más de la mitad (European Commission, 2012).

En 2025 es necesario reducir las emisiones en un 15% en total, en toda la flota vendida, y un 37.5% en 2030 comparado con 2021. Las emisiones se deben reducir en 2/3 para alcanzar el 60% reducción en 2050 que establece el *Transport White Paper* de 2011 presentado por la UE (EEA, 2019).

2.1.3 Regulación de emisiones

En este contexto, el cambio hacia nuevas fuentes de energía sostenibles necesita la intervención de los gobiernos, mediante nuevas normativas e incentivos que incrementen el desarrollo de la infraestructura necesaria para mantener nuevas alternativas. El Acuerdo de París (European Commission, 2015) establece objetivos comunes a nivel global para frenar el cambio climático y limitar el calentamiento global a 2°C. También pretende reforzar los recursos de los que disponen los países para actuar en este sentido. Fue el primer acuerdo de este tipo, porque obliga legalmente.

El sector del transporte responde muy eficazmente a cambios en la legislación, más que a otro tipo de medidas, porque los fabricantes tienen mucho poder en el mercado. La UE estableció el objetivo de emisiones de CO₂ en unos 130g/km para 2019, y los fabricantes cumplieron los cupos (European Commission, 2020) . Para 2021 se ha fijado en 95g/km, lo que ha fomentado una gran mejora en la eficiencia de los vehículos y el desarrollo de nuevas alternativas sin emisiones.

Los fabricantes pueden compensar las emisiones de los vehículos de gasoil o gasolina con renovables, lo que incentiva la fabricación y venta de modelos sostenibles. Sin embargo, aún queda mucho para cumplir con los objetivos. Para hacernos una idea, necesitarían que alrededor de un 20% de su producción total no produjesen emisiones para cumplirlo (European Commission, 2017).

La Unión Europea ha fijado los objetivos de reducción de emisiones en un 40% para 2030 sobre los niveles de 1990, lo que implicaría que el 32% de la energía tiene que ser renovable y la eficiencia debe mejorar en un 32.5% (European Commission, 2020).

Además, como parte del *European Green Deal* (European Commission, 2019), se está promoviendo establecer un objetivo más alto y que se alcance el 50% en la Unión Europea. Esto ayudaría a acercarse a la neutralidad de carbono que se persigue.

La Unión Europea pretende reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 80-90% para 2050. En el *White Paper*, la Comisión Europea (2011) señala que es necesario reducir la dependencia del petróleo y desarrollar nuevos combustibles y sistemas de propulsión, empezando por el transporte urbano e imponiendo el uso de combustibles más sostenibles en la aviación, además de depender en menor medida del transporte por carretera, que, a pesar de ser el más barato, es el más contaminante.

2.1.4 La UE promueve el eléctrico

Los avances tecnológicos y cambios sociales han provocado un drástico cambio en la movilidad en los últimos años. La tendencia más extendida es la electrificación (Möller, 2020), que se está promoviendo en Europa para alcanzar una importante reducción de emisiones, ruido, contaminación y dependencia de combustibles fósiles. Sin embargo, todo esto depende de que la electricidad se obtenga de fuentes renovables.

El futuro de la movilidad eléctrica está determinado por incentivos locales, regionales y nacionales (European Parliament, 2019). Los gobiernos europeos están promoviendo el uso del coche eléctrico. En Alemania, al comprar un vehículo eléctrico se obtiene una ayuda de 6.000€ y no se paga impuesto de circulación. En Austria, la compra de EV está exenta de IVA y otros impuestos. En Suecia, también se tiene en cuenta el mantenimiento del vehículo, la instalación del punto de recarga está exenta de impuestos y el 75% del coste de cargar el vehículo se puede deducir de otros impuestos. Bélgica cubre 4.000, España 5.500. En países como Finlandia se ha introducido un impuesto ecológico que solo pagan aquellos vehículos que utilicen combustibles fósiles.

El *EU 2050 Roadmap* (European Commission, 2012) apuesta por la electricidad como fuente de energía predominante, previendo que la demanda doble los niveles de 2005 en 2050, por un cambio de modelo en sectores como el transporte, o el suministro doméstico. Esto puede causar problemas por la saturación del sistema eléctrico, lo que llevará a la necesidad de reformarlo a nivel europeo. La generación local de electricidad compensaría la saturación de la red eléctrica. Además, el programa pretende abaratar los precios, y se propone apoyo institucional por medio de subvenciones y facilidades fiscales.

Los estados miembros colaboran con la EU para promover la movilidad sostenible. Se han introducido incentivos regionales, locales y nacionales en todos los Estados miembros, como la exención de impuestos, puntos de aparcamiento reservados,

facilidades fiscales y subvenciones para la instalación de puntos de recarga. Se puso en marcha hace unos años la *European Battery Alliance* (2020) para producir baterías en Europa, ya que ahora mismo, el 80% de las baterías vienen de Asia.

En 2016, la Comisión publicó un nuevo plan para promover movilidad de bajas emisiones, donde se resaltaba la importancia de puntos de recarga disponibles en todas las ciudades. En 2017, se creó *Europe on the Move* (EC, 2017), un paquete legislativo para hacer a Europa líder en emergía limpia y competitiva, mediante limitaciones para emisiones e incentivos para comprar vehículos de energías limpias.

Mediante el Connecting Europe Facility (CEF) e inversiones en estructura para recarga con fondos comunes la Unión Europea se está esforzando por promover que el transporte público sea eléctrico, ofreciendo ayudas del Banco Europeo de Inversión. Se han invertido 200 millones de euros en investigación para el desarrollo de baterías entre 2018 y 2020, y hasta 2027 se pretende invertir el 60% del presupuesto del CEF en desarrollar la estructura de carga (CEF, 2020).

2.1.5 Situación en el mercado

A pesar del apoyo que reciben, la adopción del mercado está siendo lenta debido a que los consumidores necesitan disponer de estaciones de carga cercanas a su domicilio o instalarlas en su propio garaje. En 2018, los vehículos eléctricos representaban el 2.5% de media en Europa, y casi la mitad están en Noruega. Como consecuencia de las nuevas regulaciones, se prevé que unos 176 de modelos eléctricos estén disponibles en 2020, y aumente hasta 333 en 2025, en el mercado europeo (European Commission, 2017). Si esto fuese así representarían el 60% en 2025.

Las ventas globales de vehículos eléctricos han crecido en los últimos años, pero sigue siendo una proporción pequeña y dependen de las ayudas institucionales (EEA, 2019). El líder en el mercado europeo de coches eléctricos es el grupo Volkswagen, con casi 50 modelos previstos para 2025. Se esperan 4 millones de vehículos eléctricos producidos en Europa para 2025, a partir de 1 millón en 2020 (Volkswagen, 2019). Está claro que los eléctricos son la opción por la que están apostando los fabricantes europeos y la Unión Europea en su esfuerzo por promover la descarbonización.

Mientras tanto, solo 14 modelos de pila de combustible se esperan para 2025 (T&E, 2019). Además de Toyota y Audi, también Volkswagen tiene previsto sacar 4 nuevos modelos hasta entonces. Las marcas asiáticas exportan vehículos a Europa, no se

producen en los miembros del grupo. Toyota produce el 40% de los de hidrógeno y se espera que continúe siendo líder en el mercado, a pesar de que entren marcas europeas.

Por lo tanto, esta tecnología no ha llegado aún a su momento de maduración y es posible que tarde una década en tener su propio espacio en el mercado. La disponibilidad de la infraestructura de carga determinará el resultado, para lo que sería necesaria una importante inversión. La Comisión Europea está promoviendo la electrificación activamente, mediante legislación e inversión, pero no están haciendo el mismo esfuerzo por introducir vehículos de pila de hidrógeno.

Tan solo Alemania está introduciendo reformas significativas, mediante el *H2 Mobility* (We are building the filling station network of the future., 2015) es un plan para invertir 350 millones de euros y construir 400 estaciones cercanas a centros urbanos. En cambio, en Asia, son muchas las potencias que están desarrollando este tipo de iniciativas. Japón y Corea del Sur planean llevar a cabo la transición a la economía del hidrógeno en la próxima década (METI, 2017).

En Europa se prevé que el número de estaciones se doble cada dos años, a partir de unas 400 en Alemania en 2023 (H2 Mobility, 2015). Corea del Sur y China tienen previsto llegar a las 830 estaciones para 2025 (METI, 2017). Con 3.000 estaciones a nivel global, se podría mantener una flota de unos 2 millones de coches de pila de hidrógeno en 2030 (T&E, 2019), y a partir de este punto, resultaría rentable continuar invirtiendo. Las mejoras de movilidad requieren de la colaboración de diferentes industrias para resolver el problema, y es en Asia donde se está desarrollando más.

2.2 Sustitución tecnológica.

La competencia entre empresas en un mismo sector pasa por la lucha por dominar el mercado, a menudo mediante tecnologías incompatibles entre ellas, por lo que es un juego de suma cero. Los fabricantes asumen un alto riesgo cuando introducen nuevas tecnologías que compiten con las ya existentes, especialmente en mercados en los que los efectos de red son altos (Hartigh, 2011), donde los consumidores no consideran la superioridad tecnológica, sino la usabilidad y la aceptación en el mercado de un producto. Por lo tanto, es más una batalla entre expectativas que entre las propias tecnologías.

Los factores que provocan que finalmente se imponga un producto se han estudiado desde diferentes perspectivas para predecir el resultado. Autores como Suarez (2006)

consideran que los factores determinantes dependen del momento en el ciclo de vida de la tecnología en cuestión. Los recursos necesarios para introducir una tecnología dominante en el mercado no suele poseerlos una sola compañía, sino que suele ser necesaria la cooperación de varias. El tamaño de las coaliciones y su poder en el mercado son determinantes para el éxito. En el caso que no ocupa, se han establecido alianzas entre marcas para investigación y desarrollo de la pila de hidrógeno, entre General Motors y Honda, Toyota y BMW, y Ford y Nissan-Renault.

Adner y Kapoor (2015) consideran que para entender la evolución de una tecnología en concreto, necesitamos conocer las tendencias en el ecosistema que la rodea. En su estudio concluyeron que a veces el progreso de una tecnología disruptiva se puede ver ralentizado porque las empresas intentan sacar el máximo beneficio de la tecnología anterior. Cuando son firmas pequeñas las que apuestan por nuevas tecnologías, dependerá de sus capacidades para establecerse en el mercado que el estándar en el sector cambie y se adopte la innovación. Sin embargo, es muy habitual que multitud de actores se resistan a adoptar la nueva tecnología, y suele tener más éxito la que se incorpore gradualmente en forma de mejoras a la antigua que presentarla como algo completamente diferente.

La sustitución es resultado de la interacción de todos estos actores que intentan mantener la antigua tecnología y los que tratan de beneficiarse de la nueva. Por esto, el mercado no siempre se beneficia de los avances técnicos disponibles en el momento, sino que la adopción de mejoras técnicas es gradual. Es decir, la curva de adopción es diferente de la curva de mejora técnica (Anderson & Tushman, 1990), y mientras el progreso científico tiende a ser lineal, la adopción en el mercado suele darse por cambios más repentinos.

Damos por hecho que una tecnología superior siempre conquistará el mercado rápidamente, sin considerar las condiciones de la demanda, y suponiendo que lo único que busca es rendimiento. Sin embargo, características como la usabilidad han demostrado ser más importantes para la aceptación de nuevos productos en el mercado que la superioridad técnica (Ansari & Garud, 2009). Christensen (1997) señaló la importancia de factores complementarios a las características del producto para su éxito en el mercado, y cómo las compañías que no las tienen en cuenta están condenadas al fracaso. La usabilidad en concreto determina la velocidad y la dimensión hasta la que se adoptarán las nuevas alternativas.

Gort y Klepper (1982) estudian el ciclo de vida de la tecnología y su desarrollo según las características de su ecosistema. Durante las fases iniciales de desarrollo, como en el caso de la tecnología de hidrógeno en la actualidad, son muy pocas las empresas que se involucran con la nueva tecnología. Cuando empieza a mejorarse y es admitida en el mercado, son más las que participan. Aunque ya se están comercializando vehículos de pila de hidrógeno, son muy pocas las empresas que lo están introduciendo en el mercado, y hay pocos modelos disponibles.

Los fabricantes dependen de que se haga la inversión necesaria en industrias complementarias para construir la infraestructura necesaria para poder mantener los vehículos. Una vez que una tecnología haya sido establecida, es muy habitual que el número de compañías disminuya, porque la competencia entre ellas dará lugar a un producto superior a los demás.

Rosenkopf y Tushman (1998) proponen que el ecosistema alrededor de una tecnología concreta evoluciona con ella, y proporciona recursos según surgen las necesidades. Las relaciones entre organizaciones se fortalecen a medida que la tecnología gana poder en el mercado. Ort (2008) también estudia cómo la innovación sigue fases cíclicas y la gran influencia sobre el desarrollo de un producto que tienen las relaciones dentro de su ecosistema.

Cao (2011) concluyó que la diversidad en el ecosistema se incrementa durante el ciclo de vida del producto, porque los actores necesitan compartir el coste y el riesgo de investigar y producir nuevas tecnologías. La investigación se especializa según se mejora el producto, y se necesita más colaboración.

Ortt (2008) concluyó que, en cada fase del ciclo de vida, diferentes actores dominan el mercado, por lo que la diversidad se incrementa. Boscherini (2013) añadió además que suelen ser las empresas pequeñas las que introducen cambios, mientras que luego son los grandes líderes quienes se hacen con el mercado, al conseguir estandarizar y reducir los costes.

Cainarca (1992) considera que el número de alianzas es un factor determinante para la densidad de la red en el ecosistema. Según se desarrolla el producto, son menos los acuerdos, y mayor la competencia. Sin embargo, Cao (2011) demostró que las alianzas aumentan con el desarrollo en ciertos sectores como en telecomunicaciones.

También se considera la fortaleza de las redes empresariales que apoyan las nuevas tecnologías. Una característica fundamental es el tamaño de la red: el número de actores implicados (Arthur, 1989). Al considerar efectos de red indirectos, como la disponibilidad de bienes complementarios, el éxito también está relacionado con el número y poder de las compañías que desarrollan tecnologías que den soporte a la nueva tecnología (Axelrod, 1995).

Suarez (2006) añade también que la fuerza de los vínculos en la red es crucial para llegar al consumidor final en vez de otras alternativas. Las relaciones entre compañías que forman un ecosistema son clave para esto, porque crean redes sólidas alrededor de la nueva tecnología.

Hartigh (2011) demuestra que cuantos más actores estén involucrados en el ecosistema empresarial, mayor sea la diversidad y más fuertes sean las relaciones entre los actores, más posibilidades hay de conseguir que la tecnología imponga en el mercado. En esta situación, el estudio de Hartigh (2011) recomienda establecer alianzas en el mercado, apostar por una nueva tecnología antes que ningún otro competidor y gestionar las expectativas de los consumidores con estrategias comerciales.

También existen otro tipo de consideraciones fuera del alcance de las compañías de desarrollo tecnológico, que pueden llevar a una adopción lenta en el mercado, mientras las antiguas seguirán dominando. Si consideramos que más allá de un determinado sector o una determinada industria, la tecnología interactúa con un ecosistema más complejo, hay nuevos elementos que entran en juego a la hora de determinar el éxito de dicha tecnología (Adner R. , 2006).

La interdependencia entre diferentes actores provoca que la nueva tecnología no pueda implementarse hasta que todos los elementos del ecosistema necesarios para su uso estén disponibles. Incluso se considera que solo tendrá éxito si es precisamente el elemento clave para completar el ecosistema al que pertenece (Bingham, 2014).

Por este motivo, es más interesante para las compañías invertir en tecnologías en sectores que estén evolucionando, y se prevean nuevos cambios que favorezcan su implantación. También sería muy interesante introducir tecnologías que puedan ser el puente entre las dos en conflicto (Kaplan, 2008).

Adner y Kapoor (2015) proponen que en vez de considerar la adopción de innovación como dos tecnologías en conflicto, se perciba como una interacción entre sus dos ecosistemas. En el caso de la industria automovilística, aún no está claro si alguna alternativa al motor de combustión interna acabará por sustituirlo en los próximos años, porque es una tecnología establecida que aún proporciona grandes ganancias a los fabricantes – General Motors, que es el grupo que menos ha desarrollado alternativas ecológicas, obtuvo en 2019 un beneficio de casi 14.000 millones de dólares (Investing, 2020). En lugar de desarrollar nuevas tecnologías, las marcas están trabajando por aumentar la eficiencia de sus motores.

Hoy en día, aunque hay compañías como Toyota que ya han desarrollado la tecnología para comercializar vehículos de pila de hidrógeno, el ecosistema no está preparado para su introducción (Yamashita, 2015). Siendo más concretos, la industria automovilística aún no está preparada para utilizar el hidrógeno como combustible estandarizado porque no está disponible la infraestructura necesaria para su producción y distribución (Nistor, 2016).

Las industrias complementarias deben evolucionar a la vez que nuevas empresas que puedan proveer los recursos necesarios para llevar a cabo el cambio, porque poder mantener un vehículo de hidrógeno depende de la distancia hasta una planta de combustible para poder repostar. Sería necesario que se estableciesen nuevos proveedores y distribuidores para estandarizar la tecnología. Es decir, la tecnología está lista para usarse, pero la infraestructura no está bien definida aún. En España, por ejemplo, hay solo seis hidrogeneras en todo el país, y ninguna está normalmente abierta al público. En 2019 se abrió la primera en Madrid para el repostaje de vehículos utilitarios (Cancela, 2019).

Otros factores como desarrollo de productos que introduzcan la tecnología a nivel usuario, el acceso a mercados extensos y la capacidad de promoción, también son determinantes, además de la solidez financiera, o la capacidad logística de la empresa para garantizar el éxito. Pero uno de los elementos más importantes a considerar es el apoyo institucional, y en este sentido, la Unión Europea está volcada en la promoción del coche eléctrico, frente a otras alternativas.

En este segundo apartado del trabajo se ha analizado la situación en la industria europea del automóvil y el progreso hacia un cambio en el modelo de movilidad tal y como lo conocemos hasta ahora. Los consumidores están concienciados de la importancia de

reconfigurar el sistema de transporte para hacerlo más sostenible, pero no encuentran incentivos económicos para hacerlo. Además, los fabricantes están introduciendo nuevas tecnologías lentamente en el mercado, y no se percibe que tengan suficiente apoyo de la industria como para impulsar una transformación significativa. En sectores muy dependientes de industrias complementarias, es imprescindible la cooperación.

3. ANÁLISIS COMPARATIVO

En este apartado se presentan las principales características del vehículo eléctrico de batería y el de pila de hidrógeno, para comparar las dos alternativas en profundidad. Se presentan no solo aspectos técnicos, sino también la situación en el actual mercado y la inversión necesaria para la implantación de los dos modelos. Se discuten para cada tecnología las principales ventajas y desventajas que presentan, intentando ofrecer una visión amplia de las diferentes consideraciones que han de tenerse en cuenta para evaluar el potencial de cada alternativa.

A nivel técnico, ambas tecnologías ofrecen alta eficiencia energética, por lo que son muy interesantes para promover la sostenibilidad del sector del transporte. Aunque todavía es necesario desarrollar más ambas tecnologías, lo cierto es que es viable sustituir el actual modelo de movilidad con cualquiera de las dos alternativas. El principal obstáculo en los dos casos es la enorme inversión en infraestructura que es necesario hacer a nivel europeo.

Las ventas están creciendo en los últimos años, pero aún representan una proporción muy pequeña del total en Europa. A pesar del gran apoyo institucional y por parte de los fabricantes al coche eléctrico de batería, su presencia en el mercado es pequeña, aunque las previsiones son que se incrementen mucho las ventas para 2030. Sin embargo, los coches de pila de hidrógeno no cuentan con el mismo apoyo y la mayoría de los consumidores incluso desconocen que existe esta alternativa. Sería necesario dedicar mucho esfuerzo a su promoción para incrementar las ventas.

Aunque hasta el momento los fabricantes europeos están cumpliendo con los objetivos de emisiones, está en duda que puedan mantener esta tendencia, ya que para alcanzar los objetivos de 2030 es imprescindible que más de la mitad de la flota en Europa sean vehículos sin emisiones, que utilicen energías renovables. Para llegar a este objetivo es necesaria la colaboración de instituciones, fabricantes y consumidores.

Por último, se analizan las posibilidades de vehículos híbridos, con diferentes combinaciones. Lo cierto es que las tecnologías híbridas suelen ser una muy buena opción como tecnología puente, para favorecer la introducción progresiva de nuevas alternativas. Es necesario que los consumidores se habitúen al uso habitual de vehículos sin emisiones, pero aún no está preparado el sistema para que se utilicen en masa. En estas circunstancias, los vehículos híbridos pueden presentar muchas ventajas. Incluso se considera que se puedan combinar las ventajas de la batería y la pila de hidrógeno.

3.1 Vehículo Eléctrico

El motor eléctrico es mucho más eficiente que el de combustión interna – tiene una tasa de conversión de energía eléctrica a mecánica entre un 70% y un 95%. Alrededor de la mitad de los consumidores se plantean adquirir un vehículo eléctrico hoy en día (McKinsey, 2018), movidos por el interés de reducir su huella de carbono. Se pueden recargar por la noche mientras están estacionados utilizando electricidad producida a partir de fuentes renovables. Ofrecen una aceleración estable y suave, son más precisos y alcanzan alta eficiencia energética a baja velocidad. Las compras de vehículos eléctricos crecen cada año en Europa, especialmente en países como Alemania o Reino Unido.

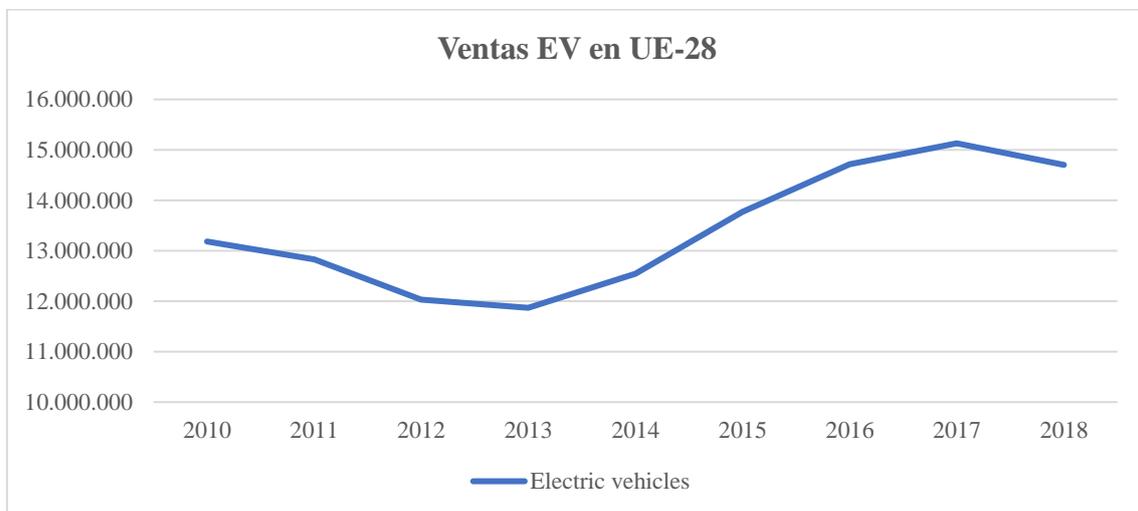


Fig. 4. Ventas de vehículos eléctricos en la UE. Datos: (EEA, 2019)

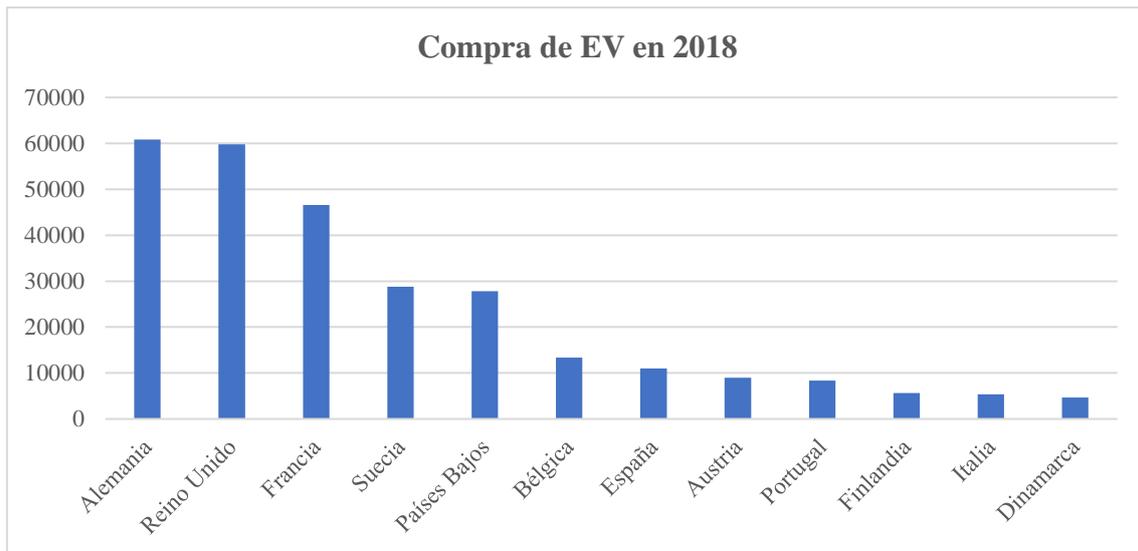


Fig. 5. Compra de vehículos eléctricos en la UE por países. Datos: (EEA, 2019)

Hace unos años se apostaba por los motores de corriente continua, que son baratos de producir, pero necesitan de mucho mantenimiento para cambiar periódicamente conmutadores y cepillos, por lo que no es cómodo para el usuario. Hoy en día, se utilizan motores de corriente alterna, que, aunque son más complejos a nivel técnico y más costosos a la hora de producirlos, son más cómodos para el conductor.

Las principales alternativas incluyen motores de reluctancia conmutada, imán permanente y de inducción, siendo este último el más común por ser barato y estable (McKinsey, 2014). El de reluctancia conmutada es baratos y fácil de producir, pero el control y diseño son complicados. Los de imán permanente son muy eficientes, y tienen alta densidad energética y estabilidad, pero son caros por los materiales.

El motor eléctrico de inducción es perfecto para vehículos ligeros, que mantengan velocidades bajas y recorran distancias cortas, por lo que es muy útil para desplazamientos urbanos. Sin embargo, también tienen desventajas, ya que las baterías tardan varias horas en cargar y su autonomía es limitada.

Es necesario adaptar la red eléctrica e instalar puntos de carga, a pesar de que la aceptación en el mercado todavía es baja, lo que requiere una importante inversión. Además, la producción es cara porque algunos elementos son escasos, o no se producen en cantidad suficiente hoy en día. Sin embargo, las baterías están reduciendo su coste anualmente de forma importante, al aumentar la demanda y la inversión. Si continúa esta

tendencia, la previsión es que el 55% de los coches vendidos en 2040 serán eléctricos o híbridos (Bloomberg, 2019).

El mayor problema al que se enfrenta es la aceptación social, debido a su alto coste inicial y poca visibilidad, aunque aumenta progresivamente, ya que los fabricantes están introduciendo nuevos modelos gracias a los incentivos institucionales (European Commission, 2012). Parece que esta es la forma más efectiva de promover su compra. Aunque el comprador tiene en cuenta factores financieros y técnicos, recibir incentivos fiscales es determinante a la hora de tomar una decisión.

Pero el vehículo eléctrico presenta varios inconvenientes que están retrasando su establecimiento en mercado, principalmente que ofrecen una autonomía muy corta y que el tiempo de recarga aún es demasiado. Además, es necesario instalar un punto de recarga doméstico, lo cual incrementa la inversión inicial necesaria.

3.1.1 Revisión técnica

- Poca autonomía

Los vehículos eléctricos tienen una autonomía muy corta, que solo permite utilizarlos para desplazamientos en ciudad (Bloomberg, 2019). Un modelo estándar ofrece unos 200km, mientras que para obtener autonomías alrededor de los 500km hay que recurrir a vehículos de gama alta como los Tesla. Aunque el desarrollo de las baterías está siendo muy satisfactorio, para conseguir mayor autonomía es necesario aumentar el peso, por lo que se trata de vehículos grandes que no interesan al usuario medio. Este factor empeora al no haber suficientes puntos de recarga disponibles en la mayoría de los países europeos.

- Recarga de la batería

El principal inconveniente que presentan los vehículos eléctricos es el tiempo que necesitan para recargar la batería. Los modelos estándar tardan entre 6 y 10 horas en recargar la batería completamente (EEA, 2018). Para instalar cargadores más rápidos, es necesario adaptar la red eléctrica de los garajes, lo que supone una inversión extra. No poder recargar la batería rápidamente, provoca que sea inadecuado para largas distancias.

- Eficiencia energética

La eficiencia energética que ofrecen se acerca al 80% (EEA, 2018), ya que se producen pérdidas durante la distribución por la red eléctrica. Una vez en el vehículo, el motor es

capaz de emplear el 95% de la energía almacenada, perdiendo muy poca proporción en forma de calor, como sí ocurre en el motor de combustión interna.

- Baja potencia

Los motores eléctricos ofrecen menos potencia que el de combustión, lo cual influye en la sensación del conductor. La aceleración es más suave, lo que permite más precisión. Además, como consiguen un buen rendimiento energético a baja velocidad, son muy interesantes para transporte urbano.

Los vehículos eléctricos necesitan ser ligeros para optimizar la potencia que ofrece el motor. El peso de las baterías supone un problema para los fabricantes, que están invirtiendo en mejorar el rendimiento. Además, reducir el tamaño del vehículo provoca que el espacio en la cabina sea pequeño en comparación con otras opciones.

3.1.2 Infraestructura

Para estandarizar el uso del vehículo eléctrico, sería necesario desarrollar la infraestructura de mantenimiento en toda Europa, incluyendo puntos de carga públicos y talleres especializados. Además, el usuario necesita instalar un punto de carga en su propio garaje, que ocupa bastante espacio y debe ir conectado a la red eléctrica de tal forma que obtenga la potencia suficiente.

Hay que reforzar la red eléctrica para dar servicio a los consumidores de tal forma que se asegure el suministro. Con la previsión de que el 15% de los coches sean eléctricos en 2030, se necesitará un 3% extra de electricidad (EEA, 2019). Y de todas formas no se cumplirían los objetivos propuestos para 2030 con una proporción tan baja de vehículos sin emisiones, por lo que la reforma de la infraestructura necesitará ser mayor.

Se están desarrollando sistemas para permitir que los vehículos puedan servir como almacenamiento temporal cuando están conectados a la red eléctrica, y se pueda recurrir a la energía almacenada en caso de picos de demanda. Esto solucionaría las fluctuaciones de producción, muy habituales cuando se utilizan fuentes renovables (T&E, 2019).

3.1.3 Modelos más vendidos

A continuación, resumo las características de los modelos más vendidos en Europa en el 2019, de acuerdo con la asociación Car Sales (2020). El precio es más alto que el de vehículos de combustión interna, pero la potencia y la velocidad máxima son más bajas.

El diseño más vendido fue el *Tesla Model 3*. Tesla es una empresa conocida por haber optimizado mucho el rendimiento de sus baterías y haber adaptado el motor eléctrico al mercado de los coches de alta gama. Con los años van introduciendo nuevos modelos destinados cada vez a un público más amplio, consiguiendo las mejores prestaciones en relación con el precio de los vehículos. La potencia, aceleración y autonomía del *Model 3* pueden competir con vehículos de combustión interna, pero el precio es mucho mayor debido al alto coste de producción de sus baterías. Se espera que la empresa siga reduciendo el precio de sus vehículos en los próximos años, mientras se crece la aceptación en el mercado de sus productos.

Todos poseen baterías de ion de litio, las más eficientes disponibles en el mercado. Como analizo en el siguiente punto, aún se está trabajando por disminuir el tamaño de las baterías, para reducir el peso que suponen en el vehículo y el coste añadido.

	Modelo	Ventas	Precio	Autonomía	Batería	Carga	Aceleración	Potencia	Peso	Máx. Velocidad
1	Tesla Model 3	95.168	49.980€	530 km	50 kWh	11h	3,4 s.	306 CV	1.600 kg	261 km/h
2	Renault Zoe	45.129	23.500€	390 km	41 kWh	14h	9,5s	136 CV	1.500 kg	140 km/h
3	Nissan Leaf	31.792	34.620	385 km	40 kWh	10h	7,5s	109 CV	1.470 kg	145 km/h
4	Volkswagen e-Golf	28.710	24.400€	275 km	35.8 kWh	12h	9,8s	136 CV	1.500 kg	150 km/h
5	BMW i3	23.882	40.600	350 km	42.2kWh	12	7.2s	170 CV	1.195 kg	155 km/h

Tabla 1. Especificaciones de los modelos eléctricos más vendidos en Europa en 2019. Elaboración propia.

3.1.4 Desarrollo de baterías

El desarrollo de baterías para los vehículos ha avanzado mucho en los últimos años, por lo que la variedad de tecnologías disponibles está aumentando. Hay modelos que utilizan baterías que se recargan durante el uso, híbridos y hasta algunos que utilizan placas solares para complementar la energía producida de otras fuentes. También disponemos de complementos que mejoran el rendimiento de la batería, como los generadores termoeléctricos, que transmiten directamente la energía producida al motor.

A continuación, comparo las alternativas más comunes:

Tipo	Energía (W h/kg)	Densidad (W h/L)	Potencia (W/kg)	Eficiencia	Ciclos	Temp. (°C)	Coste (\$/kWh)
Batería de AS	30-50	60-100	200-400	70-90 %	2000-4500	-20-60	120-150
Ni-Fe	30-55	60-110	25-110	75 %	1200-4000	-10-45	150-200
Ni-Zn	60-65	120-130	150-300	76 %	100-300	-10-50	100-200
Ni-Cd	40-50	80-100	150-350	60-90 %	2000-3000	-40-60	300-350
Ni-Cl	50-70	100-140	150-300	50-80 %	500-3000	-40-50	150-200
Li-Ion	120-140	240-280	200-300	70-85 %	1500-4500	-20-60	150-1300

Tabla 2. Comparativa de baterías. Datos: (Iclodean, 2017)

Las baterías de ácido sólido tienen baja densidad energética, aunque son las más baratas de construir. Serían necesarios unos 500kg para obtener una autonomía de 200 km, y tienen poca durabilidad, por lo que no es eficiente para vehículos que necesiten recorrer largas distancias. Es una tecnología madura, difícil de mejorar, por lo que se considera que se sustituirán por otras tecnologías en un futuro.

Los híbridos de níquel proporcionan más energía, pero es insuficiente para igualar el rendimiento de un vehículo estándar de combustión interna. El cloruro de níquel es considerado seguro, barato y durable. Sin embargo, la densidad energética es más baja, por lo que tampoco se considera viable.

La mejor opción son las de litio. Tiene alta densidad energética, porque el litio tiene el potencial electroquímico más alto para una masa más pequeña. La durabilidad es alta y tiene buena eficiencia, aunque puede presentar problemas de seguridad. Sin embargo, es insuficiente para satisfacer la autonomía demandada en el mercado, y el material es caro.

El principal problema que presentan las baterías, además de la corta autonomía, es que es complicado tratar los residuos producidos cuando se acaba su vida útil, de unos 15 años aproximadamente. Sería necesario implementar una gran infraestructura de reciclaje de materiales para evitar contaminar el medio natural.

Una buena alternativa son los ultracapacitores, que almacenan energía electrostáticamente, en lugar de mediante procedimientos químicos. Sus características permiten que su densidad de almacenamiento sea muy alta, y liberarla muy rápidamente, alcanzando una potencia más alta. Por esta razón, es muy apropiado para maquinaria que necesite alta potencia para tareas cortas. Se está considerando introducirlos para transporte público y SAEVs (Shared Autonomous Electric Vehicles), pero presentan una autonomía muy corta y su producción es cara (European Commission, 2017).

Son más duraderos que las baterías convencionales, ya que no se degradan, al no depender de elementos químicos. Existe también la opción de que funcionen como complemento a una batería, para proveer de la potencia extra que requiere, y podrían incluso retrasar su deterioro. Mejora el rendimiento del vehículo a velocidades más altas, pero reduce su autonomía en ocasiones.

Si comparamos dos modelos de batería de litio, el que tiene el extendedor de autonomía (Chevrolet Volt), da mejor rendimiento:

Modelo	Lanzamiento	Capacidad	Rango en electricidad	Autonomía
Chevrolet Volt	2014	16 kWh	60 km	480 km
Renault Fluence	2015	22 kWh	185 km	185 km

Tabla 3. Comparativa de modelos. Datos (Iclodean, 2017).

3.1.5 Estudio de costes

La UE aprobó el año pasado destinar 7.000 millones de euros a construir la infraestructura de carga necesaria para mantener una flota creciente de vehículos eléctricos en los próximos años. Los proyectos estarán cofinanciados por los Estados, por lo que la inversión final será mucho más alta (Bannon, 2019). Estima que unos 2 millones de puntos de recarga serán necesarios para 2025 (Niestadt, 2019).

	Estándar	Semi-rápido	Carga rápida
Precio	\$1,300-\$2,300	\$1,700-\$2,700	\$3,300-\$8,000
Tiempo para carga completa	8-12hs	4-6hs	40 min.

Tabla 4. Comparativa de cargadores. Elaboración propia.

Al coste de instalación hay que añadir los permisos que se requieran en cada país, y las modificaciones que sea necesario hacer en la red eléctrica para que funcione correctamente el punto de carga (HA, 2019).

McKinsey (2017) predice que el coste de las baterías será de \$100/kWh para 2030, lo que supondría una gran caída en el precio desde \$230/kWh en 2015. Por lo tanto, una batería estándar, de 40kWh costaría alrededor de \$4,000, compitiendo con el precio de un motor de combustión interna. La optimización de las baterías supone una gran bajada en el coste de los vehículos, ya que es el componente más caro debido a los materiales que la componen. Sin embargo, el precio de la electricidad ha subido en los últimos años, y se prevé que continúe esta tendencia.

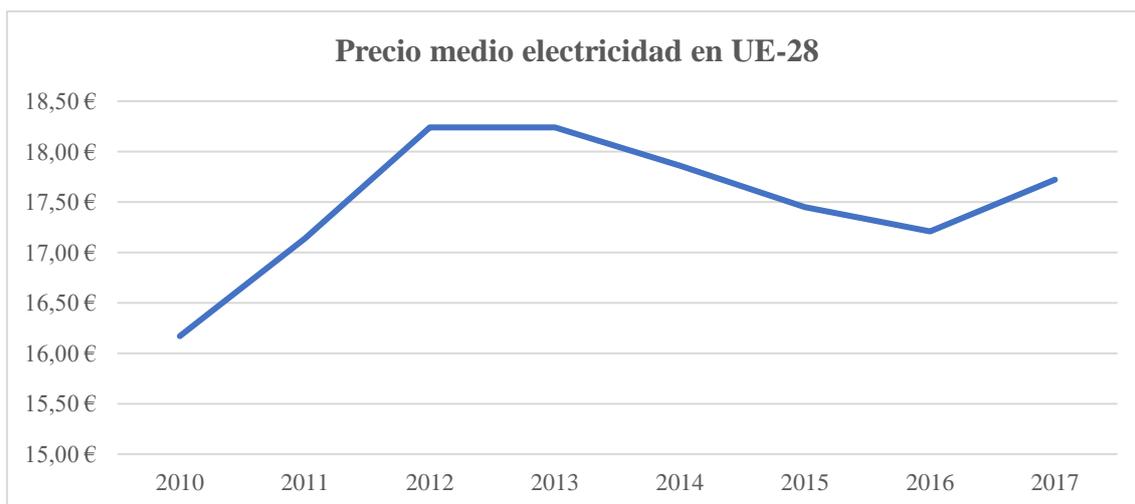


Fig 6. Precio de la electricidad en Europa. Fuente: (Eurostat, 2018)

El coste de la electricidad subirá para 2030 con el aumento de la demanda, a pesar de que las fuentes renovables son cada vez más eficientes. Se calcula que en Europa la media estará alrededor de 140€/MWh (European Commission, 2019), por lo que cargar una batería estándar de 55 kWh por completo costaría unos 7.50€ cada vez.

3.2 Vehículo de pila de hidrógeno

El transporte de pasajeros y mercancías es crucial para garantizar la estabilidad socioeconómica a nivel mundial y un desarrollo socioeconómico sostenible. Disponer de energía limpia es indispensable para mantener la sostenibilidad. En 2014, aproximadamente el 22% de la demanda energética global se cubría con fuentes renovables. Sin embargo, la EEA (2018) predice que, tal y como está distribuido el sistema, las emisiones de gases de efecto invernadero serán el doble para 2050.

Diversas Organizaciones internacionales han advertido que la situación actual llegará al punto de no retorno en 2030, por lo que es necesario hacer un cambio ahora, ya que, por su naturaleza, el sector energético necesita transiciones largas y progresivas para no desestabilizar el sistema de producción y consumo global (Amrouche & Rekioua, 2016).

Generar combustibles seguros, eficientes, limpios y viables a nivel económico es fundamental. Aunque el hidrógeno se erige como una gran oportunidad, su almacenamiento y transporte sigue siendo un gran reto en el que aún se está investigando (Sharma, 2015).

La alternativa más limpia sería utilizar vehículos que utilicen pila de hidrógeno, que proporciona mucha potencia sin emitir gases de efecto. Como indica el siguiente gráfico, el hidrógeno entra en combustión con el oxígeno a cierta temperatura, por una chispa, y el único resultado es vapor de agua.

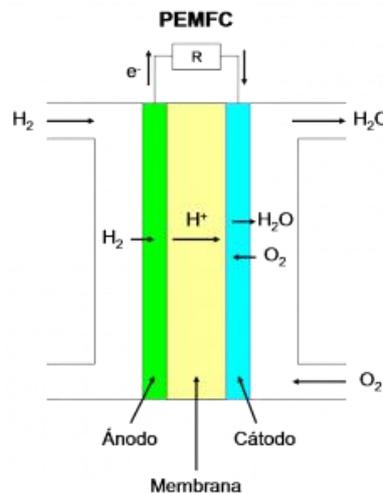


Fig 7. Pila de hidrógeno. Fuente: (Sauras, 2019)

Una pila de combustible de membrana polimérica (PEM en inglés) produce una corriente eléctrica a partir del hidrógeno del depósito y oxígeno del aire. El hidrógeno se descompone en iones, y los electrones circulan por un catalizador de platino en el ánodo. El PEM solo permite pasar los iones de hidrógeno por el cátodo, donde reaccionan con el oxígeno para producir agua. Cuando atraviesan la plataforma, forman una corriente eléctrica que impulsa el motor. La célula de hidrógeno tiene una eficiencia del 45-50%.

No se producen emisiones contaminantes, responsables de problemas ecológicos y de salud para la población. Su utilización podría reducir enormemente las emisiones de gases de efecto invernadero mientras se produzca a partir de fuentes limpias. Incluso si se utilizan fuentes fósiles, producirlo en condiciones controladas en las que se puedan capturar las emisiones sería una mejor opción que el método actual, basado en el motor de combustión interna, que las expulsa a la atmósfera. Se puede utilizar también tanto en motores de combustión como de ignición, como aditivo al combustible, o en vehículos híbridos, reduciendo las emisiones de otros combustibles.

El hidrógeno podría tener un papel fundamental en la reforma del sistema energético a nivel global, sustituyendo los combustibles fósiles para evitar las emisiones nocivas para el medioambiente y la salud de los ciudadanos. Tiene un gran potencial para protagonizar el cambio, o como complemento de otras energías, para compensar la volatilidad de la producción y garantizar el suministro continuo.

En el pasado se consideraba peligroso utilizarlo en vehículos destinados al mercado masivo. Es altamente inflamable, a niveles parecidos a la gasolina, pero se puede garantizar la seguridad, ya que en la actualidad la técnica ha evolucionado lo suficiente como para que el riesgo de accidente sea muy bajo. De todas formas, la posibilidad de crear un incendio es menor, porque en caso de que se libere a la atmósfera no se esparciría como hace la gasolina, sino que se formaría una llama vertical. Este fenómeno está relacionado con la alta difusividad en el aire, por lo que, en caso de fuga, se dispersa.

La pila de combustible convierte energía química en eléctrica y la transfiere directamente al motor. Es un método muy eficiente para almacenar energía, en lugar de utilizar batería. La principal diferencia es la forma en la que transfieren la energía, el combustible y el oxidante reaccionan dentro de la pila y transfieren la electricidad, en lugar de almacenarla. La gran ventaja es que se pierde menos energía, al transferirse directamente, se logra hasta un 85% de eficiencia. Utilizando electrólisis para producirlo, el proceso no tiene emisiones. Si la fuente de electricidad para iniciar la reacción es renovable. Se está considerando también utilizar placas solares.

Los vehículos de hidrogeno están empezando a encontrar su sitio en el mercado, y las ventas están creciendo en los últimos años, como se muestra en el siguiente gráfico.

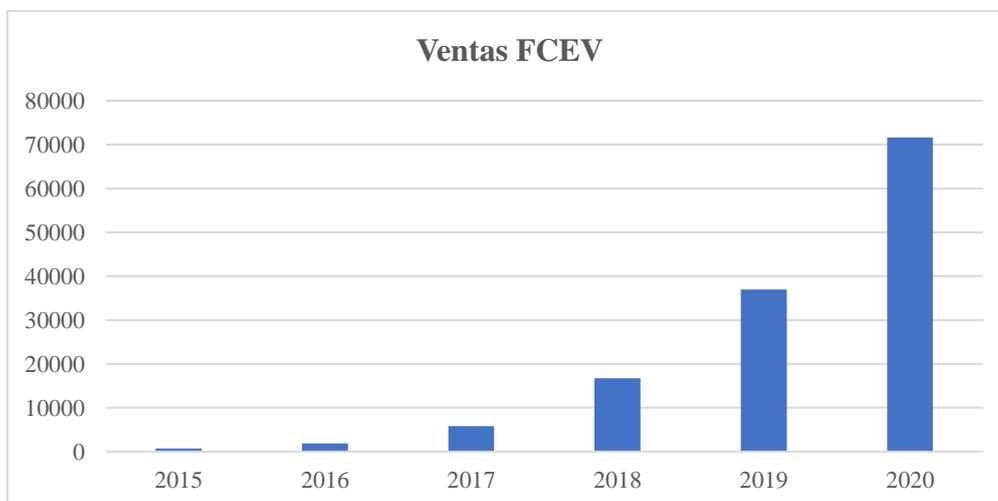


Fig 8. Ventas de vehículos de pila de hidrógeno a nivel mundial. Fuente: (Statista, 2020)

Mientras hay muchos retos a nivel técnico y de infraestructura, hay fabricantes que están apostando fuertemente por esta tecnología, porque ofrecen ventajas frente a los eléctricos. El hidrógeno es menos intensivo en capital y da más flexibilidad, aunque sea más caro de producir ahora mismo. Teniendo en cuenta que las mejores empresas de tecnología son europeas y que el apoyo a este tipo de iniciativas se promueve desde la UE, no sería complicado desarrollar los avances necesarios para implementar la técnica.

El hidrógeno es por sus características la mejor opción para llevar a cabo una reforma del sistema energético a nivel mundial para cumplir con los ambiciosos objetivos del milenio respecto a la emergencia ecológica a la que nos enfrentamos actualmente. La transición a una economía de hidrógeno es indispensable para resolver esta complicada situación, que de ninguna manera se podría conseguir sin una completa reforma del sistema.

En un reciente estudio (Midilli, 2007) sobre el papel del hidrógeno en la transición ecológica, se hicieron proyecciones con datos históricos para la economía de hidrógeno. Considerándolo en combinación con otras fuentes de energía como la solar, eólica o hidráulica, encontraron que la estabilidad y sostenibilidad del sistema aumenta con el ratio de hidrógeno utilizado sobre el total de fuentes de energía renovables. Por lo tanto, concluyeron que apostar por esta tecnología daría muy buenos resultados en cuanto a estabilidad y eficacia. De hecho, la mayor oportunidad para obtener energía limpia optimizando la eficiencia energética es utilizando hidrólisis para producir electricidad, ya que el único residuo es vapor de agua. También se está considerando un sistema de producción a partir de placas solares, sin emisiones.

3.2.1 Revisión técnica

Los vehículos de pila de hidrógeno se diferencian de los eléctricos de batería en que la energía se produce directamente en el vehículo, en lugar de almacenarla, y se transmite al motor. La alta densidad energética del hidrógeno permite que una autonomía similar a la de vehículos de gasolina, ahorrando el espacio y el peso que supondría incluir la batería. Un modelo estándar tiene alrededor de 600km de autonomía, lo que compensa la escasez de puntos de repostaje que nos encontramos hoy en día en Europa.

La potencia y la aceleración del vehículo son también comparables a uno de gasolina, y da muy buen rendimiento en larga distancia y alta velocidad. Conseguir una potencia alta, permite fabricar vehículos más pesados y espaciosos que los de batería. La sensación del conductor es suave, al tratarse de un motor eléctrico, pero tiene mayor aceleración.

La eficiencia es inferior a un motor eléctrico porque se pierde energía en forma del calor en el proceso, pero las prestaciones son superiores. Mientras que la eficiencia de un motor de gasolina se acerca al 60%, el de hidrógeno supera el 80% de eficiencia (METI, 2017).

Fabricantes como Volkswagen (2019) no confían en la pila de hidrógeno en el mercado de vehículos ligeros porque el proceso para obtenerlo y transportarlo es menos eficiente que el del coche eléctrico, y apuntan a que se pierde hasta un 70% de la energía desde que se pone en marcha la electrólisis hasta que se utiliza en el coche. Gran parte de esta degradación se produce durante el proceso de compresión y transporte.

3.2.2 Almacenaje y transporte

El almacenamiento de hidrógeno es una tecnología clave para el desarrollo de pilas más eficientes. Para utilizarlo en estado sólido, es necesario reducir el híbrido a polvo y compactarlo para formar placas que se puedan almacenar y utilizar de forma segura. Se están considerando sistemas de almacenamiento en los vehículos de pila de hidrógeno que utilicen híbridos metálicos en depósitos de alta presión.

Forma de almacenamiento	Ventajas	Desventajas
Gas Comprimido	Seguro Transporte cómodo	Alto coste de transporte
Líquido	Se optimiza volumen	Alto coste Condiciones de baja temperatura Inseguro
Híbrido metálico	Alta eficiencia de volumen Seguridad	Materiales costosos Grandes tanques de almacenamiento

Tabla 6. Almacenamiento de hidrógeno. Fuente: (Hydrogen Europe, 2020).

Los híbridos metálicos son la mejor opción, por su seguridad y eficiencia, pero resulta caro mantenerlos porque se necesita tecnología compleja y mano de obra experta. El gas comprimido es más fácil de distribuir y utilizar, pero menos eficiente y con más coste de operaciones, en lugar de en grandes tanques. Además, por sus propiedades termodinámicas, ofrecen la oportunidad de utilizar energía térmica directamente para comprimir gas de hidrógeno, sin necesidad de procesos mecánicos (Hydrogen Europe, 2020). Estos compresores se están desarrollando y están disponibles en el mercado.

El híbrido de magnesio, que es el más barato por ser muy abundante en la naturaleza, es especialmente interesante, aunque la deshidrogenación requiere temperaturas de 300°, lo que requiere técnicas complejas para que la reacción tenga lugar correctamente (Moller

K. , 2017). El almacenamiento seguro de hidrógeno es clave para desarrollar de la tecnología.

3.2.3 Modelos en el mercado

Hyundai fue la primera empresa en producir vehículos de pila de hidrógeno en masa, pero se retiró del mercado y no retomó la producción hasta el 2018, cuando apostó por el Nexo. Toyota empezó a comercializar el Toyota Mirai en 2015, que tuvo muy buena acogida en el mercado, y pretende sacar una versión mejorada el año que viene, con mejor rendimiento y diseño. Estos dos modelos están extendidos en países asiáticos, como Japón o Corea, donde el motor de pila de hidrógeno ha conseguido buena aceptación.

En Europa, el modelo más vendido es el Honda Clarity, considerablemente más barato que los anteriores. No puede competir en precio con modelos de motor de combustión, pero ofrece muy buen rendimiento técnico. La mayoría de los vehículos se vendieron en Alemania, donde la red de hidrogenas está en desarrollo.

	Modelo	Ventas	Precio	Autonomía	Aceleración	Potencia	Max. Velocidad	Peso
1	Honda Clarity	11.654	57.000€	650 km	9s	174 CV	165 km/h	1.845 kg
2	Hyundai Nexo	362	72.250€	670 km	9,5s	184CV	180 km/h	1.814 kg
3	Toyota Mirai	160	80.300€	500 km	9,6s	154CV	175 km/h	1.925 kg

Tabla 7. Modelos de pila de hidrógeno más vendidos en Europa. Elaboración propia.

3.2.4 Métodos de producción

Una alternativa a los combustibles fósiles debe ser viable técnica y económicamente, además de segura y respetuosa con el medio ambiente. El hidrógeno es el elemento más abundante en el planeta, formando parte de otros compuestos. Se caracteriza por tener más capacidad energética que ningún otro combustible respecto a su masa: 122kJ/kg (Bloomberg, 2020). De hecho, triplica el coeficiente de la gasolina, por lo que puede mejorar la eficiencia del motor de forma significativa. El hidrógeno tiene muy buen rendimiento energético y es un excelente combustible alternativo.

Una de las grandes ventajas de utilizar hidrógeno, es su gran disponibilidad, porque es el elemento más abundante en la Tierra. Sin embargo, como no se encuentra en la naturaleza de forma pura, sino que forma parte de otros compuestos, es necesario obtenerlo de

manera artificial. La clave para avanzar hacia un sistema energético sostenible será la fuente de la cual se obtenga el hidrógeno, porque se puede obtener fácilmente de combustibles fósiles, pero esto seguiría contribuyendo a la liberación de CO₂.

Hoy en día, el 99% del hidrógeno consumido, se produce a partir de fuentes fósiles, y es complicado descarbonizar la producción. Existen multitud de proyectos para conseguir obtener hidrógeno de forma eficiente a partir de hidrólisis, lo cual tendría un gran potencial para avanzar hacia los objetivos fijados por la UE para 2030.

La producción de hidrógeno podría ser potencialmente libre de emisiones si la electricidad para producirlo proviniese de energías renovables. De todas formas, al producirlo en ambientes controlados, se podría evitar liberar gases de efecto invernadero.

A continuación, comparo diferentes alternativas para obtenerlo, centrándome en la eficiencia del proceso y su coste relativo. Hay que recordar que el coste se reduciría en gran medida en caso de que la producción aumentase para satisfacer una demanda mayor.

Método	Implementación	Eficiencia	Emisiones	Coste
Gas Natural reformado con vapor	Principal fuente de hidrógeno actualmente	75%	Emisiones de CO ₂	Método más barato Infraestructura ya existente
Carbón	Producción en grandes cantidades	45%	Emisiones de CO ₂	Barato y accesible
Electrólisis a partir de agua	Escasa	80%	Sin emisiones	Método más caro No hay infraestructura
Energía solar	Escasa	65%	Sin emis.	Caro, en desarrollo

Tabla 5. Comparativa de métodos de fabricación de hidrógeno. (Hydrogen Europe, 2020)

Prácticamente la totalidad del hidrógeno consumido hoy en día se produce a partir de reformación de gas metano, en una reacción química que libera gran cantidad de CO₂. Al producirlo en ambientes controlados, se podría evitar que saliesen en forma de emisiones y capturarlos para otros usos. Otra fuente también muy barata es el carbón, pero no tiene sentido utilizarlo porque se produce menos energía de la consumida.

Con electrólisis, se utiliza electricidad para descomponer las moléculas de agua y obtener hidrógeno, sin liberar gases de efecto invernadero. La electricidad que se necesita para desencadenar el proceso debe ser obtenida también a partir de fuentes renovables como de placas fotovoltaicas, que cada vez producen energía más barata, para que el proceso sea completamente limpio. Es necesaria mucha inversión para poner en marcha la

producción de esta tecnología, y transformar todo el sistema de producción actual. Sin embargo, la inversión se recuperaría en unos pocos años de actividad.

La electrólisis depende del precio de la electricidad, que, en caso de que aumentase la demanda, subiría. Para que fuese competitivo, el coste de obtener la energía por estos métodos tendría que ser 4 veces menor que el precio de la electricidad comercial utilizando combustibles fósiles (Hosseini & Wahid, 2016). La tecnología aún está en una fase muy temprana en su desarrollo, por lo que, con el aumento de la inversión en investigación, se podría mejorar enormemente su eficiencia técnica.

3.2.5 Uso como aditivo

Dado el gran potencial del hidrógeno como combustible, una de las aplicaciones más inmediatas, que ya ha demostrado resultados, es incorporarlo en motores convencionales, como aditivo en el aire que interviene en la combustión. Es habitual utilizar compuestos enriquecidos con hidrógeno, y Tangoz (2017) condujo un estudio y concluyó que los mejores resultados se obtienen con una mezcla de hidrógeno 5% en gas natural (HCNG5). En este caso, la velocidad de combustión de la mezcla de hidrógeno con aire es seis veces más rápida que sin hidrógeno. Sin embargo, se libera mucha energía en forma de calor, que se podría aprovechar mediante un catalizador que produzca el hidrógeno de la mezcla.

A medida que se aumenta la proporción de hidrógeno en la mezcla, la combustión es más rápida, lo que incrementa la presión en los pistones y mejora la eficiencia térmica en el motor (Du & Wang, 2016). Además, la alta temperatura de ignición del hidrógeno y la rapidez con la que se consume, lo hace más seguro que otros combustibles porque la llama y la propagación son más cortas – perdiéndose también menos energía en forma de calor.

El enriquecimiento con hidrógeno facilita la combustión completa, sin formar residuos, ya que reduce el combustible liberado sin haberse quemado completamente, algo muy habitual en motores convencionales. Implementando un reformador de metano a vapor (en el tubo de escape para utilizar el calor que desprende), se puede llegar a una eficiencia del 113% al convertir el metanol en hidrógeno (Chen & Kao, 2017), que tiene más capacidad energética. De esta manera, se mejora el rendimiento del vehículo al mismo tiempo que se reducen las emisiones de gases contaminantes.

Se puede utilizar tanto en motores de combustión como de ignición (Sharma, 2015), produciendo cantidades ínfimas de gases de efecto invernadero. En motores de gasolina

es necesario cambiar el sistema de inyección para incluir el sistema que lleva el gas a los pistones de forma controlada. Sin embargo, la utilización de mezcla con una concentración de hidrógeno hasta un 20% no requiere ningún ajuste en el motor (Anstrom & Collier, 2016).

Utilizar el hidrógeno como aditivo a otros combustibles mejora el rendimiento del motor. Chen & Kao (2017) calculan que la adición de hidrógeno en el proceso economiza entre el 5 y el 30% de combustible, obteniendo menos residuos – se reduce el humo de escape en un 70% y los contaminantes globales en casi un 50%. En este supuesto, se reducen las emisiones de HC, CO y CO₂, mientras se mantienen las de NO (Zhang, 2016), debido a que la temperatura de los cilindros es más alta. Utilizando Hythane (una mezcla del 15% de metano) se obtiene un 7% más energía que normal. Es necesario adaptar el motor de ignición para utilizarlo, pero no es complicado a nivel técnico.

Los motores de ignición se pueden adaptar al hidrógeno utilizando la inyección de puerto (Verhelst, 2009). Utilizando la misma mezcla de gas natural, se reducen considerablemente las emisiones contaminantes, que han sido la causa de la imposición de limitaciones a este tipo de vehículos, por lo que es una alternativa con mucho potencial para adaptar la tecnología a estos requisitos. Se consigue mejor eficiencia térmica y se reducen las emisiones de gases nocivos para la salud. Sin embargo, surgen algunos problemas en cuanto a la variabilidad del ciclo.

En motores diésel, también se puede utilizar una mezcla de metano e hidrógeno con hasta un 30% de concentración (Sadiq, 2004). Las pruebas del estudio de Singh (2016) demostraron que, para obtener resultados óptimos en cuanto a eficiencia, la concentración de hidrógeno en el metano debe de ser entre 20-30% según la temperatura. Las emisiones de HC y CO decrecen en un 30% y un 80% respectivamente en estas condiciones; sin embargo, las emisiones de NO aumentan en un 13% (Sadiq, 2004). El NO se forma por el aumento de temperatura en los cilindros (Dimitriou, 2017) El incremento marginal de temperatura según aumenta la concentración no provoca inestabilidad en el motor, como se había señalado en otros estudios.

El uso del hidrógeno en la industria automovilística parece asegurar una mejora significativa en el rendimiento de motores de ignición (Sadiq, 2004). El uso de gas natural en motores diésel ha dado resultados muy positivos en cuanto a la reducción de emisiones contaminantes, que han sido la causa de limitaciones impuestas a este tipo de vehículos,

por lo que puede ser una forma muy atractiva de reinventar el modelo. Se consigue mucha eficiencia térmica y se reducen las emisiones de gases nocivos para la salud. Sin embargo, surgen algunos problemas en cuanto a la variabilidad del ciclo (Dimitriou, 2017).

3.2.6 Estudio de costes

La escasez de modelos que utilicen la pila de hidrógeno y su difícil mantenimiento hacen que suba el precio de los vehículos. Sin embargo, en caso de que se apostase por esta tecnología desde las instituciones y se aumentase la inversión, los fabricantes buscarían soluciones para ampliar su mercado y democratizar la tecnología. Honda está ofreciendo modelos más baratos que los de Toyota gracias a que la pila de sus vehículos es más pequeña, lo que permite además diseños más espaciosos.

La producción de la pila de hidrógeno resulta cara porque se necesita utilizar platino, que es considerado un metal precioso. La IEA (2007) calcula que para la producción en masa de unos 100 millones de vehículos al año, habría que aumentar la producción actual diez veces, lo que presenta un reto para la industria. La mejor opción sería reciclarlo de unos vehículos a otros, recomprar los motores una vez hayan cumplido su vida útil.

La producción de pilas de hidrógeno ya está cerca de poder competir en precio con modelos de combustión interna de gama media. Gracias a la eficiencia técnica que se está consiguiendo en los últimos años, el coste se ha reducido a unos \$40/kW (Moreno, 2015), por lo que una pila de hidrógeno con una potencia de unos 150 CV rondaría los \$5.000.

El principal problema que encontramos para la instauración de la economía del hidrógeno es que no se invierte lo suficiente en infraestructura por los altos costes que supondría, debido a que la tecnología necesaria para utilizar hidrógeno es compleja. Sin embargo, Nistor (2016) concluye que la inversión de una estación de recarga de hidrógeno podría recuperarse en alrededor de 5-10 años, aproximadamente lo mismo que una gasolinera. Basándose en datos de Reino Unido, considera que utilizando energía eólica, que ya es más barata que alternativas fósiles, podría producirse hidrógeno de forma rentable.

El mantenimiento del vehículo es costoso, principalmente por el alto coste del combustible, pero, invirtiendo en la producción de hidrógeno a gran escala, bajarían los precios. La demanda ha crecido en los últimos años, lo que favorece que baje el precio.

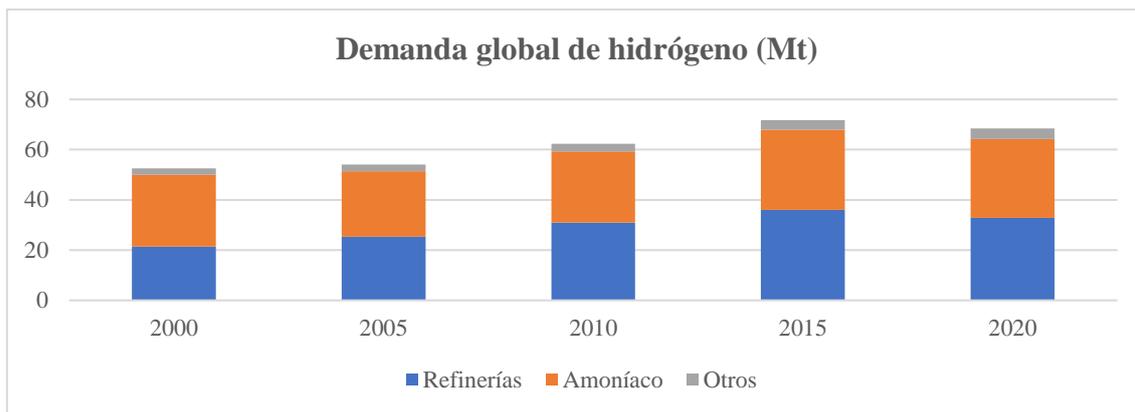


Fig 9. Demanda global de hidrógeno. Fuente: (IEA, 2020)

Los principales elementos que incrementan el coste del hidrógeno se reducirán en los próximos años, desde su producción industrial, al aumentar la demanda, distribución y motores que lo utilicen. En concreto, se calcula que la electrólisis será viable a nivel comercial a gran escala para 2025. El coste de las renovables ha disminuido un 80% desde 2010 y grandes potencias intentan reducir su dependencia del petróleo de esta manera.

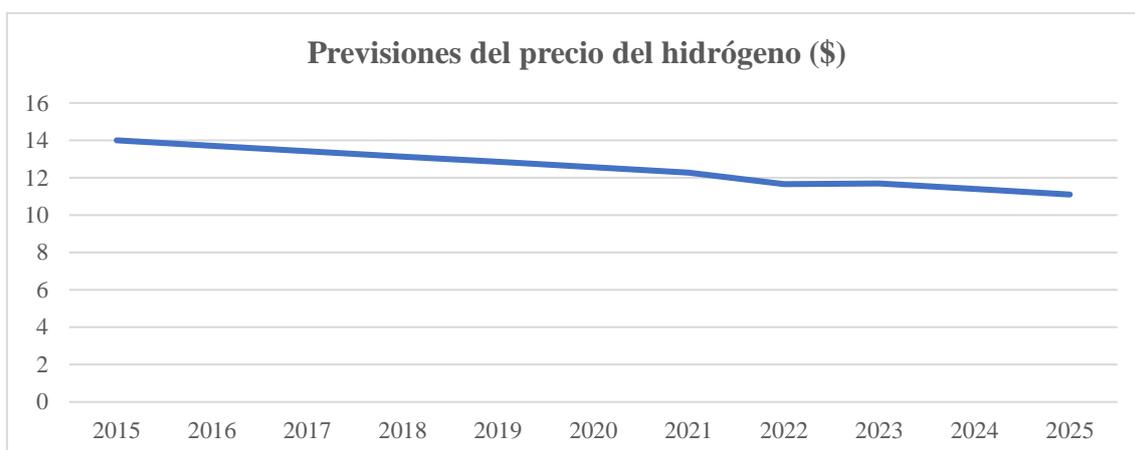


Fig 10. Previsiones de precio del hidrógeno hasta 2025. Fuente (California Energy Commission, 2015)

Un reporte del Hydrogen Council (2020) considera que el coste del hidrógeno caerá lo suficiente para utilizarlo en consumo masivo para 2030 – hasta un 50% -, haciéndolo mucho más atractivo para el consumidor medio. Es necesario seguir reduciendo los costes del hidrógeno, que si se produjese según lo estimado, en 2030 costaría menos de \$4/kg, que tiene la energía comparable a un galón de petróleo. Sin embargo, hoy en día cuesta alrededor de \$15. Bloomberg (2020) es más optimista y considera que podría estar por debajo de los \$2/kg antes de 2030, lo que lo haría muy competitivo con energías alternativas. Esto requeriría una inversión acumulada de \$150.000 millones, y podría utilizarse también en otras industrias.

La inversión es escasa porque no hay suficiente demanda, por lo que los fabricantes necesitan incentivos gubernamentales para producirlos. Con el apoyo de las instituciones, será posible aumentar la producción y reducir los costes de los vehículos y su mantenimiento.

Un estudio del Hydrogen Council (Hydrogen Council, 2020), que considera las economías de USA, EU, China, Japón y Corea del Sur, se calcula que para 2030 será necesario haber invertido unos 70.000 millones de dólares en infraestructura para que sea viable la transición al hidrógeno, y hasta 280.000 millones en total, en todo el mundo. Esta cifra representa un 5% del gasto energético global anual, por lo que es asumible. Alemania invirtió 30.000 millones de euros en renovables en 2019 por lo que es completamente viable llegar a esa cifra a nivel global.

Para 2050, podría mantener una flota de 400m de coches, 20m de camiones, alrededor del 25% del sector del transporte por carretera (Hydrogen Council, 2017). También el 5% de los aviones y barcos para 2050. El potencial de mercado serían en total unos 2.5 billones de dólares al año, y repercutiría positivamente en industrias que ahora dependen del petróleo. El potencial de mercado serían en total unos 2.5 billones de dólares al año.

Uno de los mayores problemas que presenta es que aún no disponemos de la infraestructura necesaria para su distribución, con lo que la adaptación de gaseoductos parece la opción más rápida. Sin embargo, en lugares poco poblados no saldría rentable esta inversión. Una de las soluciones más interesantes en este caso es que se produzca energía de forma local, por medio de electrólisis, instalando paneles solares.

La infraestructura para almacenar, transportar y distribuir el hidrógeno requeriría la inversión de unos 20.000 millones de dólares para construir estaciones. A la hora de transportarlo, son necesarios gaseoductos o depósitos de alta presión que lo mantengan en forma líquida. Se trata de la misma tecnología que ya se utiliza para gas natural, por lo que se podría adaptar.

El precio bajaría enormemente con el aumento de la inversión. En Alemania, el coste medio de una estación ha bajado de 2 millones de euros en 2008 a 1 millón de media hoy en día (FuelCellWorks, 2019). El coste de los motores también se ha reducido un 50% en el mismo período, gracias al aumento en la demanda de platino.

3.2.7 Modelos híbridos

Una buena opción para introducir las nuevas alternativas es apostar por los híbridos, que ya llevan en el mercado largo tiempo y son bien aceptados entre los consumidores. En el caso de híbridos eléctricos, no necesitan cargar, sino que recargan las baterías sobre la marcha, resolviendo el inconveniente que presentan los completamente eléctricos.

Se está intentando seguir una estrategia similar para introducir el hidrógeno, como complemento a la gasolina o el gasoil en motores tradicionales, para mejorar la eficiencia del motor, además de reducir las emisiones. Sería muy interesante desarrollar esta técnica para incentivar la inversión paralela en infraestructuras que permitan estandarizar el hidrógeno. Se han llevado a cabo multitud de estudios con relación al rendimiento de coches híbridos y los resultados son muy satisfactorios, por lo que ésta podría ser una tecnología puente para facilitar la migración hacia una economía de hidrógeno.

También se ha considerado utilizar una pila de hidrógeno para extender la autonomía de los eléctricos, y así compensar la poca capacidad de las baterías en largas distancias. Sería muy atractivo para 2030 (Offer G. J., 2010). Aproximadamente un 80% eléctrico y un 20% hidrógeno sería lo ideal.

3.3 Análisis y comparación

3.3.1 Emisiones

Las emisiones resultantes de la producción de electricidad dependen completamente de la fuente de la que se obtenga. La producción de energía a partir de fuentes renovables está creciendo en Europa, y ya hay en marcha multitud de planes para promover la instalación de nuevas plantas, especialmente hidráulicas y fotovoltaicas. La proporción crece especialmente en el uso doméstico, por lo que la tendencia apunta a que progresivamente se reducirán las emisiones y los vehículos eléctricos podrán utilizar energía limpia.

La Comisión Europea financió el proyecto HyWays en 2008 (IEA, 2008) y concluyó que, si para 2050 el 80% de los vehículos en carretera fuesen propulsados por pila de hidrógeno, se reducirían en un 50% las emisiones de CO₂. Para este escenario se consideraron las infraestructuras disponibles en aquel momento para su generación y distribución, que ahora están más desarrolladas. Esto demuestra el potencial para contribuir a la sostenibilidad del sistema de transporte europeo.

Una de las características del proyecto del nuevo Mirai más ambiciosas, es incluir un sistema para filtrar del aire contaminantes como el óxido de nitrógeno y el óxido de sulfuro, para impulsar no solo la descarbonización sino mejorar la calidad del aire en las ciudades. El nuevo modelo incluye una pila más pequeña y mejor eficiencia en el combustible que el anterior (Toyota, 2020).

3.3.2 Técnica

Las baterías utilizadas en BEVs tienen una densidad energética muy pequeña, por lo que, para rendir una buena autonomía, tienen que ser grandes, pesadas, y, por lo tanto, más caras. La presente tecnología requiere 150kg de litio para 200 km, que se queda lejos de la capacidad del vehículo de gasolina convencional, con un depósito de unos 100kg de peso para 500km o más. A nivel técnico, que el almacenamiento químico de electricidad y su conversión tengan lugar en el mismo dispositivo, presenta problemas de rendimiento.

Los coches de pila de hidrógeno resuelven estos inconvenientes, ya que el depósito está separado del catalizador, y tiene un tamaño similar al de gasolina, gracias a la gran densidad energética del hidrógeno (Tollefson, 2008). Sin embargo, almacenar el hidrógeno de forma segura en estado líquido es complejo, y requiere de una tecnología sofisticada. La autonomía y la facilidad para repostar un vehículo de pila de hidrógeno es mucho más conveniente para el conductor que esperar durante horas a cargar una batería.

Se puede decir en definitiva que el vehículo de pila de hidrógeno resuelve los inconvenientes técnicos del eléctrico de batería mientras mantiene la experiencia del conductor similar a la del estándar en el mercado. Es por esta razón que argumento que se trata de una tecnología superior. El factor que dificulta su penetración en el mercado es la falta de estaciones de repostaje en Europa, mientras que cada vez se construyen más puntos de recarga eléctrica públicos, para vehículos de batería.

Dado que sus ventajas son de alguna manera complementarias, se podrían crear sinergias fabricando tecnologías híbridas. Offer (2006) demuestra que combinar los dos podría suponer ahorro en cuanto a capital inicial y mantenimiento para los usuarios. Algunos ejemplos híbridos son el Mercedes GLC F-Cell y Audi H-Tron, que se van a empezar a comercializar este mismo año con un depósito de hidrógeno y una batería adicional que permite enchufarlo o en un punto de carga, pero también genera electricidad cuando el vehículo está en marcha. La combinación de los dos aumenta la potencia y la autonomía.

Otro factor muy importante es la viabilidad comercial también es importante: que la gente confíe en la tecnología.

Modelo	Precio	Autonomía	Batería	Aceleración	Potencia	Máx. Velocidad
Mercedes GLC F-Cell	51.400€	400 + 80 km	13.5 kWh		210 CV	160 km/h
Audi H-Tron		600 km		7s	120+188 CV	200 km/h
Renault Kangoo	48.300€	350 km		16.8s	110 CV	152 km/h

Tabla 8. Modelos híbridos eléctricos con pila de hidrógeno en el mercado europeo. Elaboración propia.

3.3.3 Costes

La producción de células de hidrógeno tiene un coste alto en este momento, pero la producción en masa abarataría mucho los precios. La IEA (2007) calcula que para 2030, los vehículos eléctricos y de pila de hidrógeno podrán competir con el motor de combustión interna. También Offer (2006) demuestra que en 2030 los FCEV podrían alcanzar la paridad de coste con los vehículos de gasolina convencionales. Esto es debido al desarrollo técnico, que ha permitido reducir los costes de producir los motores.

En la siguiente tabla se recogen sus previsiones:

	Escenarios 2030		
	Optimista	Pesimista	Estándar
Coste del motor:			
Combustión interna	\$2,400	\$2,530	\$2,465
Pila de hidrógeno	\$7,000	\$14,060	\$10,530
Eléctrico de batería	\$6,200	\$9,530	\$7,865
Híbrido eléctrico + hidrógeno	\$4,000	\$7,330	\$5,665

Tabla 9. Predicciones de coste de fabricación en 2030. Fuente: (IEA, 2007)

Una aportación clave del estudio es que la mejor opción para el desarrollo de los FCEVs es el híbrido FCHEV. En todos los escenarios, el híbrido FCHEV es más eficiente en cuanto a costes frente al vehículo eléctrico y el de pila de hidrógeno. Por esta razón, Offer (2006) defiende que el híbrido es la mejor alternativa en cuanto a inversión inicial al combinar las ventajas de las dos tecnologías, lo que permite utilizar una pila de hidrógeno estándar y combinarla con una batería pequeña como asistente para momentos en los que se necesite aumentar la potencia puntualmente.

Es necesario tener en cuenta los costes de mantenimiento también. La siguiente tabla resume las previsiones de la IEA:

	Optimista	Pesimista	Estándar	Distancia (millas)
Gasolina	\$19	\$38	\$28.5	253
Hidrógeno	\$14	\$56	\$35	506
Electricidad	\$27	\$45	\$36	1013

Tabla 10. Predicciones de coste de combustibles en 2030. Fuente: (IEA, 2007)

La demanda de los vehículos eléctricos es sensible al precio de la energía, lo que supone que se debe controlar desde las instituciones. Sin embargo, el vehículo híbrido sería menos sensible a fluctuaciones en el precio de cada una de las fuentes de energía: la electricidad y el hidrógeno, eliminando este inconveniente en los dos casos.

4. UTILIDADES ALTERNATIVAS DEL HIDRÓGENO

En el apartado anterior se han comparado las posibilidades que ofrecen el motor eléctrico de batería y el de pila de hidrógeno, y se ha argumentado que es este último el que dispone de capacidades técnicas superiores. Sin embargo, debido a la falta de inversión en Europa, es muy complicado que llegue a imponerse. De todas formas, es posible que se establezca en el sector energético para cubrir aquellas funciones que el motor eléctrico de batería no puede realizar por falta de potencia.

La principal ventaja que tiene el motor de pila de hidrógeno es la potencia que alcanza, por lo que puede representar una buena oportunidad para descarbonizar el transporte pesado. Tiene capacidad para mover vehículos pesados, desde camiones a barcos y aviones. De hecho, ya se están presentando los primeros modelos en Japón. Introducir el motor de pila de hidrógeno en el transporte de mercancías internacional supondría una gran disminución en las emisiones del sector, y un avance hacia los objetivos de 2030.

También se puede utilizar como complemento a otras energías, especialmente renovables, que no ofrecen suministro eléctrico constante ni estable, a pesar de los grandes avances técnicos de los últimos años. Es fundamental que el cambio en el modelo energético garantice la seguridad y la sostenibilidad del sistema. En cualquier caso, está claro que se trata de una muy buena oportunidad para compensar las deficiencias que presentan otras energías aún en desarrollo.

4.1 Maquinaria pesada

Después del análisis realizado en el punto anterior, queda claro que el coche eléctrico tiene muchas posibilidades de monopolizar el transporte urbano, por sus características técnicas y el apoyo institucional que está recibiendo. Mientras que la mayoría de los sectores pueden fácilmente adaptarse a la electrificación, y de hecho está previsto que esto ocurra en los próximos años, en otros sectores, como la aviación, barcos, o maquinaria pesada, será más complicado.

Se está consiguiendo una buena eficiencia en la producción de electricidad a través de fuentes renovables y ya es más barata que con fuentes fósiles en algunos casos, pero no pueden cumplir los requerimientos de potencia de aparatos pesados. El motor eléctrico no ofrece la suficiente potencia ni eficiencia para responder a las necesidades de estos aparatos, por lo que será necesario utilizar fuentes de energía más potentes y eficientes, y

es posible que el hidrógeno quede relegado a este papel (Davis, N. S, & Shaner, 2018). En vehículos que necesiten de mucha autonomía y se utilicen frecuentemente, como los utilizados en el transporte de mercancías pesadas, el hidrógeno es la mejor opción.

Todo vehículo con una potencia superior a los 160 km/h es más eficiente con un motor de hidrógeno que con uno eléctrico. Aunque son más caros en el momento de producirlos, son más eficientes a largo plazo. Además, repostar es mucho más conveniente, porque consiste en llenar un tanque, para conseguir mucha potencia. Es un combustible muy versátil que da mucho rendimiento, por lo que se podría utilizar para mover vehículos pesados, sustituyendo los combustibles fósiles.

El *European Green Deal* establece el objetivo de neutralidad de carbono para 2050. Para ello, es necesario reducir un 90% de las emisiones en transporte, teniendo en cuenta que constituye un cuarto del total de CO₂ liberado en Europa. En vehículos pesados, se establece que se debe reducir un 15% para 2025 y 30% para 2030, y esta es una gran oportunidad para el hidrógeno. Es especialmente interesante para camiones de más de 16t, destinados a recorrer largas distancias, en sectores de logística o distribución, que necesitan estabilidad a la vez que potencia. Los primeros modelos se pondrán en marcha en 2025 y se espera que hasta 100.000 vehículos estén operativos en 2030. Se necesitarían alrededor de 1,000 estaciones de repostaje en Europa para cubrir las principales rutas.

El 98.3% de los camiones hoy en día en Europa utilizan motores de combustión, pero se espera que la reducción de los costes de la tecnología sea sustancial para 2030 (Hydrogen energy, 2020), con lo que la tasa de adopción se acelerará. Hyundai y Toyota están trabajando para producir camiones, además de utilitarios.

La adaptación de los vehículos no es complicada, y para el usuario el mantenimiento es muy similar, por lo que no necesitará cambiar sus costumbres de utilización. La alta densidad energética del hidrógeno acerca el rendimiento del motor a los de combustión.

Para uso industrial es muy atractivo por su gran densidad energética y la posibilidad de proveer energía con gran potencia. También se podría usar en sectores como el transporte marítimo, dando lugar a más demanda y la consecuente bajada de costes.

Es imprescindible un aumento del apoyo político para desarrollar la infraestructura, a nivel tanto europeo y como nacional. Además, el tráfico internacional está aumentando en los últimos años, con lo que es crucial desarrollar alternativas sostenibles y eficaces

para garantizar el desarrollo humano sin deteriorar la sostenibilidad medioambiental. Tenemos la oportunidad de construir un sistema energético global sostenible.

4.2 Transición ecológica y seguridad energética

Satisfacer la demanda energética se está convirtiendo en uno de los grandes retos a nivel global, dado el rápido aumento en las necesidades tanto en países desarrollados como emergentes (Hosseinabad & Moraga, 2020). La seguridad energética se refiere a asegurar la disponibilidad de energía para un país en el futuro, aumentando la independencia gracias a sus propios recursos naturales. El riesgo de cortes en el suministro de energía provocaría inestabilidad económica.

Para garantizar que las necesidades futuras se podrán cumplir, se debe recurrir a recursos propios o fijar precios estables en el mercado (Bastan, 2018). Utilizar las energías renovables disponibles de forma natural es la principal forma en la que los países están reduciendo su dependencia energética de la importación de combustibles.

Además de ofrecer la posibilidad de producir energía sin emisiones contaminantes, el hidrógeno reduce la dependencia de combustibles y de su transporte a las plantas de producción, porque se puede obtener a partir de agua por medio de electrólisis. Europa ganaría en seguridad, estabilidad e independencia energética, lo cual tendría importantes repercusiones en las relaciones comerciales internacionales.

El transporte en Europa depende en un 94% del petróleo (Hydrogen Council, 2017), y se calcula que suponen 187.000 millones de euros al año en importaciones. En un estudio, se calcula que en Estados Unidos se podrían ahorrar hasta \$17bn para 2025 si se sustituyesen las plantas energéticas y se apostase por energía renovable utilizando los recursos nacionales, con lo que es una inversión que merece la pena considerar (Hydrogen Council, 2020). Dependiendo de las características de cada planta, se podría recuperar la inversión en un plazo entre 10 y 30 años.

También presenta la oportunidad de utilizarlo en edificios, para proveer energía de forma local, sin necesidad de utilizar la infraestructura de cables desde las estaciones de producción. La calefacción y el suministro de agua caliente representan el 80% del consumo energético residencial, responsable del 12% de las emisiones globales (Hydrogen Council, 2020). El hidrógeno tiene un gran potencial de resolver este problema instalando generadores en los propios edificios.

En hogares que ya estuvieran conectados a la red de gas natural, adaptar el sistema para utilizar hidrógeno es sencillo. Con una pequeña inversión, se puede transportar un combinado de gas natural enriquecido con hidrógeno. En Japón ya hay unos 200.000 edificios que utilizan hidrógeno líquido puro, y ya han caído los precios un 50% desde 2010 (Hydrogen Council, 2020).

Además, establecer un modelo común, aunando recursos, permitiría promover la unidad y cohesión entre sus miembros, en un momento en el que las tensiones internas crecen rápidamente. También sería una gran oportunidad para liderar la transición energética global, clave para mantener su poder geopolítico y económico en la promoción de la sostenibilidad.

4.3 Mejora de eficiencia de la red eléctrica

Utilizar fuentes renovables para obtener energía presenta el gran problema de no poder regular la producción, por lo que es muy habitual que se desperdicie gran parte de la electricidad generada. Además, suele coincidir que los períodos que demandan más energía son los que se produce menos, y viceversa. Por ejemplo, en Alemania, la demanda aumenta un 30% en invierno y la producción disminuye a la mitad (McKinsey, 2019). Por lo tanto, la oferta no es capaz de adaptarse a la demanda. Es necesario aumentar la flexibilidad del sistema para garantizar el servicio a los consumidores.

La dificultad para almacenar electricidad es un problema que lleva dando problemas al sector durante muchos años, porque las baterías no dan un buen rendimiento. Gracias a la gran densidad energética del hidrógeno, puede ser una buena alternativa para aumentar la eficiencia del sistema, utilizando los excesos de producción para desencadenar electrólisis, y almacenar el hidrógeno resultante, economizando espacio al mismo tiempo. El hidrógeno tiene gran potencial como complemento de otras energías también obtenidas a partir de recursos renovables, para compensar la volatilidad de la producción y garantizar el suministro continuo (Moller K. , 2017).

Este sistema tendría la capacidad de mejorar la eficiencia del sistema actual, adaptándose mejor la producción a las fluctuaciones de la demanda. El hidrógeno podría compensar los picos de demanda, produciéndolo mediante electrólisis con el exceso de electricidad generada por renovables, almacenándolo, y utilizándolo después cuando sea necesario. No se desperdiciaría energía, con lo que la eficiencia del sistema aumenta.

Además, el transporte de hidrógeno en gaseoductos es mucho más eficiente: mientras que la red eléctrica pierde energía mientras la transporta, la eficiencia del transporte de hidrógeno líquido es casi del 100%. Esto lo hace una buena opción para transportarlo en grandes cantidades internacionalmente. En Japón tienen previsto utilizar cargueros para transportarlo a partir del año que viene, y Leeds ha propuesto adaptar su gaseoducto para transportar hidrógeno líquido este año. Cuando se incremente la producción, los costes de transporte disminuirán, entre un 30 y un 40% en los próximos 15 años.

5. CONCLUSIONES

El sistema energético actual no permite proveer de energía a una población con necesidades crecientes de una forma sostenible. La industria del transporte es responsable de gran parte de las emisiones anuales que se producen en Europa en la actualidad, y el sector del automóvil en concreto se está enfrentando a la demanda cada vez mayor de un modelo renovado, alejado de la explotación de combustibles fósiles.

En los últimos años, se han introducido mejoras en cuanto a la eficiencia de los vehículos para reducir las emisiones, como respuesta a cambios de normativas, cada vez más exigentes en su defensa del medio natural. La Unión Europea está decidida a impulsar la electrificación del transporte con este fin, y cada vez es más el apoyo que brinda a modelos eléctricos de batería.

Sin embargo, otras potencias como Japón o Corea están impulsando la adopción de modelos de pila de hidrógeno, que ofrecen prestaciones superiores a nivel técnico. En Europa no se está dando la inversión necesaria para favorecer el desarrollo de esta tecnología, lo que provoca la insuficiencia de la infraestructura de mantenimiento disponible en todo el territorio y la escasez de modelos en el mercado. Esta situación repercute en la demanda, por el momento muy pequeña y localizada en países como Alemania o Reino Unido, que han puesto en marcha planes para promover la instalación de hidrogeneras.

La escasez de demanda de diseños de pila de hidrógeno supone una subida en el precio de los vehículos y en el combustible, siendo la producción muy pequeña todavía. El precio es uno de los principales factores que influyen en la adopción de una tecnología en el mercado, por lo que es necesario promover la producción para reducir los costes y al mismo tiempo aumentar la demanda. Se espera que, con la inversión necesaria, el desarrollo técnico y la producción a gran escala esta tecnología pueda competir en precio para 2030 con el vehículo eléctrico y con el de combustión interna.

La compatibilidad es otra de las principales características que determinan el éxito de una tecnología en el mercado, y mientras el vehículo eléctrico de batería necesita varias horas para recargarse como mínimo, repostar el depósito de hidrógeno en un vehículo de pila de combustible supone unos pocos minutos. Además, el rendimiento del motor es muy similar al de uno de combustión interna, lo que permite al conductor tener una experiencia similar al estándar del mercado.

Sin embargo, la escasez de estaciones de repostaje hace que la usabilidad, el factor más determinante para que se de una sustitución tecnológica, sea muy baja. En Alemania, hay en marcha planes para instalar estaciones de repostaje de hidrógeno que dependen la colaboración de iniciativas públicas y privadas, lo que es clave para conseguir la implicación de toda la industria. Esta estrategia ha demostrado ser la más efectiva hasta ahora, por lo que son los países miembros quienes deberían seguir este modelo para impulsar la adopción del vehículo de pila de hidrógeno.

En cambio, gracias a la inversión que está recibiendo el eléctrico de batería, tanto desde la industria automovilística como de instituciones europeas, ha permitido desarrollar una red de carga eficiente en las principales ciudades de la UE. Esto es un factor clave para la aceptación de la tecnología en el mercado, tanto por la accesibilidad a la infraestructura como por la demostración explícita de apoyo que supone.

Los fabricantes con más cuota de mercado en Europa, como General Motors o Volkswagen, están apostando por modelos eléctricos de batería, mientras son empresas asiáticas, como Honda o Toyota quienes están invirtiendo más en desarrollar el vehículo de pila de hidrógeno. Es posible que la Unión Europea haya decidido aliarse con la estrategia de los líderes del mercado europeo al aportar fondos para el desarrollo de la infraestructura necesaria para la adopción de modelos eléctricos. Una opción muy interesante en este punto son las tecnologías híbridas entre estas dos opciones, que se están empezando a comercializar este año.

En industrias con la del automóvil, en las que los efectos de red son clave para introducir una nueva tecnología, es necesario la colaboración de diferentes actores para su desarrollo y la implantación. El ecosistema de la tecnología y el poder que este posea dentro de la industria determinan el éxito en el mercado. En este sentido, es más importante la percepción de los consumidores que las características técnicas en sí. Los consumidores apuestan por la tecnología que consideran que se impondrá en el futuro, por lo que se trata de una batalla de expectativas.

Tras analizar estos factores, y teniendo en cuenta que la penetración en el mercado de vehículos sin emisiones es aún muy pequeña, puedo concluir que lo más probable es que el vehículo eléctrico de batería se imponga en el transporte urbano llegado el momento. La velocidad a la que lo haga dependerá del apoyo institucional que reciba, que si continúa con la actual tendencia, será creciente.

Sin embargo, en sectores en los que las características técnicas no puedan satisfacer las necesidades de los vehículos, se impondrá el hidrógeno. Lo más probable es que el transporte de mercancías pesadas, ya sea por tierra, mar o aire, utilice hidrógeno principalmente antes de 2050, como resultado de la creciente exigencia por reducir las emisiones contaminantes en Europa. También resulta muy atractivo para el transporte público urbano y para mover maquinaria pesada. Ya hay fabricantes, como Toyota, Honda o Renault que están desarrollando vehículos pesados con pila de hidrógeno, aunque todavía no se comercializan. El mercado de vehículos sin emisiones está creciendo gracias a la intervención de las instituciones.

La Unión Europea ha fijado el objetivo de reducir un 40% las emisiones sobre los niveles de 1990 para 2030, lo que requeriría una renovación de la flota muy significativa. La penetración en el mercado de vehículos sin emisiones aún es muy pequeña, inferior al 5%, pero se espera que alcance más de un 50% en 2030. En cualquier caso, es necesario cambiar el modelo de producción de la energía empleada en los vehículos, ya que en la actualidad, tanto el hidrógeno como la electricidad se obtienen principalmente a partir de fuentes fósiles, a pesar de que existen alternativas limpias – electrólisis y placas fotovoltaicas, respectivamente.

El cambio en el modelo energético tendría importantes consecuencias a nivel geopolítico para Europa, al aumentar su autonomía y garantizar la seguridad energética de los países, que en este momento dependen de fuentes fósiles para satisfacer su demanda nacional. Liderar la transición ecológica supone para Europa una gran oportunidad de reafirmar su poder e influencia a nivel internacional.

Tras la crisis del COVID-19, el sector del automóvil se ha paralizado, tanto por el cierre de las fábricas como por la bajada de ventas, al prohibirse los desplazamientos en muchos países. Esta situación ha afectado gravemente a los grandes fabricantes, que tienen la oportunidad de renovar su modelo de negocio. Es importante que transformen sus productos siguiendo las demandas del mercado. Las energías renovables serán clave en la reforma del sector energético y de la industria automovilística en los próximos años.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Adner, & Kapoor. (2015). Innovation Systems and the pace of substitution: re-examining technology S-Curves. *Strategic Management Journal*.
- Adner, R. (2006). Match your innovation strategy to your innovation ecosystem. *EuroMed Journal of Business*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/334504900_Identifying_and_describing_constituents_of_innovation_ecosystems_A_systematic_review_of_the_literature
- Aiginger, K. (2016). *New Dynamics for Europe: reaping the benefits of socio-ecological transition*. Obtenido de EconStor: <https://www.econstor.eu/handle/10419/169308>
- Albayrak, B. (2012). *Use of Hydrogen-Methane Blends in Internal Combustion Engines*. Obtenido de IntechOpen: <https://www.intechopen.com/books/hydrogen-energy-challenges-and-perspectives/use-of-hydrogen-methane-blends-in-internal-combustion-engines>
- Alrazen, A. (2018). HCNG fueled spark-ignition (SI) engine with its effects on performance and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(1): 324-342. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117312868>
- Amrouche, S. O., & Rekioua, D. (2016). Overview of energy storage in renewable energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(45): 20914-20927. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319916309478>
- Anderson, P., & Tushman, M. (1990). Technological discontinuities and dominant designs. *Administrative Science Quarterly*, 35(4). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/243768027_Technological_Discontinuities_and_Dominant_Designs_A_Cyclical_Model_of_Technological_Change
- Ansari, S., & Garud, R. (2009). Inter-generational transitions in socio-technical systems: the case of mobile communications. *Research Policy*, 38(2): 382-392. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048733308002795>
- Anstrom, J., & Collier, K. (2016). Blended hydrogen–natural gas-fueled internal combustion engines and fueling infrastructure. *Compendium of Hydrogen Energy*, 219-232. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423638000086>
- Axelrod, R. (1995). Coalition Formation in Standard-Setting Alliances. *Management Science*, 41(9): 1493-1508. Obtenido de <http://www-personal.umich.edu/~axe/Axelrod%20et%20al%20Unix%201995.pdf>

- Bannon, E. (2019). *EU agrees €7bn budget for greener transport infrastructure*. Obtenido de Transport Environment: <https://www.transportenvironment.org/press/eu-agrees-%E2%82%AC7bn-budget-greener-transport-infrastructure>
- Bastan, M. (2018). A System Dynamics Model for Policy Evaluation of Energy Dependency. *Conference Paper*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/326059456_A_System_Dynamics_Model_for_Policy_Evaluation_of_Energy_Dependency
- Bingham, C. (2014). The Opportunity Paradox. *MIT Sloan Management Review* , 56(1): 29-49. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/279332832_The_Opportunity_Paradox
- Bloomberg. (2019). *Electric Vehicle Outlook 2019*. Obtenido de <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>
- Bloomberg. (2020). *Hydrogen Economy Outlook*. Obtenido de <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>
- Boscherini, L. (2013). The process of organisational change in open innovation: Evidence from high tech firms. *International Journal of Entrepreneurship and Innovation Management*, 17:177 - 205. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/264822902_The_process_of_organisational_change_in_open_innovation_Evidence_from_high_tech_firms
- Cainarca. (1992). The Evolution of Transaction Governance in the Textile-Clothing Industry. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 7(4): 351-374. Obtenido de Journal of Economic Behavior & Organization: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0167268186900119>
- California Energy Commission. (2015). *Joint Agency Staff Report on Assembly Bill 8: Assessment of Time and Cost Needed to Attain 100 Hydrogen Refueling Stations in California* . Obtenido de <https://www2.energy.ca.gov/2015publications/CEC-600-2015-016/CEC-600-2015-016.pdf>
- Cancela, C. (2019). *La primera hidrogenera de Madrid y la importancia de que haya más en España*. Obtenido de https://www.elconfidencial.com/motor/2019-06-22/hidrogenera-madrid-toyota-mirai-enagas-urbaser_2083660/
- Cao, H. (2011). Product life cycle: The evolution of a paradigm and literature review from 1950-2009. *Production Planning and Control*, 23(8):1-22. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/254305492_Product_life_cycle_The_evolution_of_a_paradigm_and_literature_review_from_1950-2009
- Car Sales. (2020). *European EV Sales in 2019*. Obtenido de <https://carsalesbase.com/european-sales-2019-ev-phev/>
- CEF. (2020). *Connecting Europe Facility*. Obtenido de https://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/cef_en

- Chen, S., & Kao, L. (2017). An onboard hydrogen generator for hydrogen enhanced combustion with internal combustion engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(33): 21334-21342. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917308558>
- Christensen, C. (1997). *Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms To Fail*. Harvard Business School Press.
- Davis, S. J., N. S, L., & Shaner, M. (2018). *Net-zero emissions energy systems*. Obtenido de Science Magazine: <https://science.sciencemag.org/content/360/6396/eaas9793.full>
- Deloitte. (2020). *2020 Global Automotive Consumer Study*. Obtenido de <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Manufacturing/gx-2020-global-automotive-consumer-study-europe.pdf>
- Demandt, B. (2019). *European sales 2018 EV and PHEV segments*. Obtenido de <https://carsalesbase.com/european-sales-2018-ev-phev-segments/>
- Dimitriou, P. (2017). A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38): 24470-24486. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917331464>
- Du, Y., & Wang, J. (2016). Research on combustion and emission characteristics of a lean burn gasoline engine with hydrogen direct-injection. *International Journal of Automotive Technology*, 9(4):415-422. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/225710543_Combustion_and_emission_characteristics_of_a_lean_burn_natural_gas_engine
- EBA. (2020). *EBA Business Investment Platform*. Obtenido de <https://www.eba250.com/>
- EC. (2017). *Europe on the Move*. Obtenido de https://ec.europa.eu/transport/modes/road/news/2017-05-31-europe-on-the-move_en
- EEA. (2015). *Air quality in Europe – 2015 report*. . Obtenido de <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2015>
- EEA. (2018). *Trends in atmospheric concentrations of CO₂ (ppm), CH₄ (ppb) and N₂O (ppb), between 1800 and 2017* . Obtenido de https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/atmospheric-concentration-of-carbon-dioxide-5#tab-chart_6
- EEA. (2019). *New electric vehicles in the EU-28* . Obtenido de https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/new-electric-vehicles-in-eu-28#tab-chart_2
- European Commission. (2019). *Energy prices and costs in Europe*. Obtenido de https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/epc_report_final_1.pdf
- European Commission. (2011). *Mobility and Transport*. Obtenido de https://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2011_white_paper_en

- European Commission. (2012). *Energy Roadmap 2050*. Obtenido de https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf
- European Commission. (2015). *Acuerdo de París*. Obtenido de https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es
- European Commission. (2017). *Electrification of the Transport*. Obtenido de [file:///C:/Users/ESICE/Downloads/Report_ElectrificationoftheTransportSystem.pdf%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/ESICE/Downloads/Report_ElectrificationoftheTransportSystem.pdf%20(1).pdf)
- European Commission. (2019). *European Green Deal*. Obtenido de https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf
- European Commission. (2020). *2030 climate & energy framework*. Obtenido de https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- European Parliament. (2019). *Electric road vehicles in the European Union*. Obtenido de [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637895/EPRS_BRI\(2019\)637895_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637895/EPRS_BRI(2019)637895_EN.pdf)
- Eurostat. (2018). *Gross inland energy consumption by fuel, EU-28, 1990-2017*. Obtenido de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview
- Eurostat. (2018). *Gross inland everyy consumption by fuel, EU-28, 1990-2017*. Obtenido de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview
- Financial Times. (2018). *FT Guide: The Energy Transition*. Obtenido de <https://www.ft.com/reports/energy-transition-guide>
- FuelCellWorks. (2019). *Germany: New Hydrogen Fueling Stations Now Open in Bayreuth and Berg*. <https://fuelcellworks.com/news/germany-new-hydrogen-fueling-stations-now-open-in-bayreuth-and-berg/>.
- H2 Mobility. (2015). *We are building the filling station network of the future*. Obtenido de <https://h2.live/en/h2mobility>
- HA. (2019). *How Much Does An Electric Car Charging Station Installation Cost?* Obtenido de https://www.homeadvisor.com/cost/garages/install-an-electric-vehicle-charging-station/?__cf_chl_captcha_tk__=eda8d2bee333cb06fe0b9261346d298461a6fe9a-1588147957-0-AUDXzLkKFxZFPfLtl6YG_vdKxhflDNKt0SrsW5-B1XRFFhYYsDbHGag36mhsOzq9RA64HA1tGkyD_-k6tuZHsNnKwaNs
- Hartigh, E. (2011). *Business ecosystems: A research framework for investigating the relation between network structure, firm strategy, and the pattern of innovation diffusion*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/228842915_Business_ecosystems_A_r

research_framework_for_investigating_the_relation_between_network_structure_firm_strategy_and_the_pattern_of_innovation_diffusion

- Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57: 850-866. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115014951>
- Hydrogen Council. (2017). *Hydrogen: scaling up*. Obtenido de <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>
- Hydrogen Council. (2020). *PATH TO HYDROGEN COMPETITIVENESS: A COST PERSPECTIVE*. Obtenido de <https://hydrogencouncil.com/en/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/>
- Hydrogen Europe. (2020). *Hydrogen Production*. Obtenido de <https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-production-0>
- Iberdrola. (2017). *'Smart cities': la revolución tecnológica llega a las ciudades*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/innovacion/smart-cities>
- Iclodean, C. (2017). Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles. *IOP Conference Series*, 252. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/General-parameters-of-the-Electric-Battery-component_tbl2_320581530
- IEA. (2007). *Energy Technology Essentials: Fuel Cells*.
- IEA. (2008). *Hyways. A European Roadmap*. Obtenido de http://ieahydrogen.org/Activities/National-Documents/Task-18/HyWays_External_Document_02FEB2006.aspx
- IEA. (2020). *Energy Transitions Indicators*. Obtenido de <https://www.iea.org/articles/energy-transitions-indicators>
- IEA. (2020). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- Kaplan, S. (2008). Thinking about Technology: Applying a Cognitive Lens to Technical Change. *SSRN Electronic Journal*, 37(5):790-805. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/222523509_Thinking_about_Technology_Applying_a_Cognitive_Lens_to_Technical_Change
- L. Rosenkopf, M. T. (1998). The Coevolution of Community Networks and Technology: Lessons From the Flight Simulation Industry. *Industrial and Corporate Change*, 7(2):311-46. Obtenido de

- https://www.researchgate.net/publication/5212758_The_Coevolution_of_Community_Networks_and_Technology_Lessons_From_the_Flight_Simulation_Industry
- M. Gort, S. K. (1982). Time Paths in the Diffusion of Product Innovations. *The Economic Journal*, 92(367): 630-653 . Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/2232554?seq=1>
- McKinsey. (2014). *Electric vehicles in Europe: Gearing up for a new phase?* Obtenido de <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Locations/Europe%20and%20Middle%20East/Netherlands/Our%20Insights/Electric%20vehicles%20in%20Europe%20Gearing%20up%20for%20a%20new%20phase/Electric%20vehicles%20in%20Europe%20Gearing%20up%20for%20a%20new%20phase.a>
- McKinsey. (2017). *Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability.* Obtenido de <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Automotive%20and%20Assembly/Our%20Insights/Electrifying%20insights%20How%20automakers%20can%20drive%20electrified%20vehicle%20sales%20and%20profitability/Electrifying%20insights%20-%20How%20automakers%2>
- McKinsey. (2019). *Germany's energy transition at a crossroads.* Obtenido de <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/germanys-energy-transition-at-a-crossroads>
- METI. (2017). *Basic Hydrogen Strategy Determined.* Obtenido de https://www.meti.go.jp/english/press/2017/1226_003.html
- Midilli, A. (2007). On hydrogen and hydrogen energy strategies I : Current status and needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(3):255-271. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/223121256_On_hydrogen_and_hydrogen_energy_strategies_I_Current_status_and_needs
- Moller, K. (2017). Hydrogen - A sustainable energy carrier. *Progress in Natural Science*, 27: 34-40.
- Moreno, N. (2015). Approaches to polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) and their cost. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52: 897-906. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115008047>
- Niestadt, M. (2019). *Electric road vehicles in the European Union: trends, impacts and policies.* Obtenido de European Parliament: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637895/EPRS_BRI\(2019\)637895_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637895/EPRS_BRI(2019)637895_EN.pdf)
- Nistor, S. (2016). *Technical and economic analysis of hydrogen refuelling.* Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261915013215>

- Nistor, S. (2016). Technical and economic analysis of hydrogen refuelling. *Applied Energy*, 167: 211-220. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261915013215>
- Offer, G. (2006). Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. *Energy Policy*, 38(1):24-29. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/222517464_Comparative_analysis_of_battery_electric_hydrogen_fuel_cell_and_hybrid_vehicles_in_a_future_sustainable_road_transport_system
- Offer, G. J. (2010). Comparative analysis of battery electric,. *Energy Policy*, 24-29. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421509006260>
- PWC. (2017). *The automotive industry and climate change*. Obtenido de <https://www.pwc.com/th/en/automotive/assets/co2.pdf>
- PWC. (2020). *Five trends transforming the Automotive Industry*. Obtenido de <https://www.pwc.com/gx/en/industries/automotive/publications/eascy.html>
- R. Ortt, P. V. (2008). The Evolution of Innovation Management towards Contextual Innovation. *European Journal of Innovation Management* , 11(4). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/228765914_The_Evolution_of_Innovation_Management_towards_Contextual_Innovation
- Sadiq, A. (2004). Effect of compression ratio, equivalence ratio and engine speed on the performance and emission characteristics of a spark ignition engine using hydrogen as a fuel. *Renewable Energy*, 29(15):2245-2260. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/229297393_Effect_of_compression_ratio_equivalence_ratio_and_engine_speed_on_the_performance_and_emission_characteristics_of_a_spark_ignition_engine_using_hydrogen_as_a_fuel
- Sauras, A. (2019). *¿Qué es la pila de combustible de un automóvil?* Obtenido de Auto Fácil: <https://www.autofacil.es/coches-electricos-e-hibridos/2019/10/14/pila-combustible/52797.html>
- Sharma, S. (2015). Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43: 1151-1158.
- Singh, S. (2016). Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 51:623–633. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/280054574_Hydrogen_A_sustainable_fuel_for_future_of_the_transport_sector
- Singh, S. (2016). Performance Analysis Of (Hydrogen+Biogas) As Fuel For Si Engine. *Imperial journal of interdisciplinary research*, 2. Obtenido de [https://www.semanticscholar.org/paper/Performance-Analysis-Of-\(Hydrogen%2BBiogas\)-As-Fuel-Singh/7ce2ad5b2b19a339fb6382c9b1bbc68e15f26feb](https://www.semanticscholar.org/paper/Performance-Analysis-Of-(Hydrogen%2BBiogas)-As-Fuel-Singh/7ce2ad5b2b19a339fb6382c9b1bbc68e15f26feb)

- Statista. (2020). *Projected global fuel cell vehicle unit sales between 2015 and 2020* .
Obtenido de <https://www.statista.com/statistics/644545/global-sales-of-fuel-cell-vehicles/>
- Suarez, F., & Casumano, M. (2006). Product, Process, and Service: A New Industry Lifecycle Model. *MIT*. Obtenido de <http://web.mit.edu/sis07/www/cusumano.pdf>
- T&E. (2019). *Electric Surge: Carmakers' electric car plans across Europe 2019-2025*.
Obtenido de https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019_07_TE_electric_cars_report_final.pdf
- Tangoz, S. (2017). *The effect of hydrogen on the performance and emissions of an SI engine having a high compression ratio fuelled by compressed natural gas*.
Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/316603212_The_effect_of_hydrogen_on_the_performance_and_emissions_of_an_SI_engine_having_a_high_compression_ratio_fuelled_by_compressed_natural_gas
- Tollefson, J. (2008). Hydrogen vehicles: Fuel of the future? *Nature*, 464(7293):1262-4.
Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/43352133_Hydrogen_vehicles_Fuel_of_the_future
- Toyota. (2020). *Toyota develops fuel cell system for maritime applications*. Obtenido de <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/31321325.html>
- Verhelst, S. (2009). Increasing the power output of hydrogen internal combustion engines by means of supercharging and exhaust gas recirculation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(10): 4406-4412.
- Volkswagen. (2019). *Hydrogen or battery? A clear case, until further notice*. Obtenido de <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2019/08/hydrogen-or-battery--that-is-the-question.html>
- Volkswagen. (2019). *Volkswagen significantly raises electric car production forecast for 2025*. Obtenido de <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/volkswagen-significantly-raises-electric-car-production-forecast-for-2025-5696>
- Yamashita, A. (2015). *Development of High-Pressure Hydrogen Storage System for the Toyota "Mirai"*. Obtenido de Toyota Motor Corp.: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2015-01-1169/>
- Zhang, B. (2016). Performance of a hydrogen-enriched ethanol engine at unthrottled and lean conditions. *Energy Conversion and Management*, 114: 68-74. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416300218>