



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

ESTUDIO DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS EXISTENTES AL MOTOR DE COMBUSTIÓN Y SU IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y PROCESOS
SOSTENIBLES

Autor: Pedro Antonio Lacárcel Puche

Director: José Javier López Cascales

Cartagena, 09/07/2021



Universidad
Politécnica
de Cartagena

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer el trabajo a mi familia y amigos por el apoyo incondicional recibido durante la realización del mismo, y por acompañarme en este camino.

También agradecer a mi tutor, José Javier López Cascales, por la ayuda recibida durante la realización del presente trabajo.

LISTADO DE ABREVIATURAS

- **ACEA:** *European Automobile Manufacturers Association* (Asociación de Constructores Europea de Automoción)
- **AEO:** *Annual Energy Outlook* (Perspectiva Energética Anual)
- **AEV:** *Advanced Electrified vehicles* (Vehículos 100% eléctricos y de hidrógeno)
- **CAT:** Centro de Tratamiento Autorizado
- **CE:** Comisión Europea
- **CFCs:** Clorofluorocarburos
- **CO:** Monóxido de Carbono
- **CO₂:** Dióxido de Carbono
- **COV:** Compuestos Orgánicos Volátiles
- **DGT:** Dirección General de Tráfico
- **EEA:** *European Environment Agency* (Agencia Europea de Medioambiente)
- **EEUU:** Estados Unidos
- **EGR:** *Exhaust Gas Recirculation* (Recirculación de Gases de Escape)
- **EHC:** Electrically Heated Catalyst (Catalizador Calentado Electricamente)
- **EPA:** *Environmental Protection Agency* (Agencia de Protección Medioambiental)
- **ERS:** *Energy Recovery Systems* (Sistemas de Recuperación de Energía)
- **EC:** *Electric Vehicle* (Vehículos Eléctrico)
- **FAP:** Filtro Anti-Partículas
- **FCV:** *Fuel Cell Vehicle* (Vehículo de pila de combustible)
- **GREET:** *Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation* (Gases de Efecto Invernadero, Emisiones Reguladas y Uso de Energía en el Transporte)
- **GWP:** *Global Warming potential* (Potencial de Calentamiento Global)
- **HC:** Hidrocarburos inquemados
- **HCT:** Trampas de Hidrocarburos
- **IEA:** *International Energy Agency* (Agencia Internacional de Energía)
- **INE:** Instituto Nacional de Estadística
- **IPCC:** Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
- **KERS:** *Kynetic Energy Recovery Systems* (Sistemas de Recuperación Cinética de Energía)
- **MP:** Materia particulada
- **NO_x:** Óxidos de Nitrógeno
- **O₃:** Ozono
- **OMS:** Organización Mundial de la Salud
- **OICA:** *Organization of Motor Vehicle Manufacturers* (Organización de Constructores de Vehículos de Motor)
- **Pb:** Plomo
- **PEMS:** *Portable Emissions Measurement Systems* (Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones)

- **PMI:** Punto Muerto Inferior
- **PMS:** Punto Muerto Superior
- **PVC:** Policloruro de vinilo
- **RACE:** Real Automóvil Club de España
- **REE:** Red Eléctrica Nacional
- **RPM:** Revoluciones Por Minuto
- **SCR:** *Selective Catalytic Reduction* (Reducción Catalítica Selectiva)
- **SO₂:** Dióxido de azufre
- **TERS:** *Thermal Energy Recovery Systems* (Sistemas de Recuperación Térmica de Energía)
- **UE:** Unión Europea
- **VFU:** Vehículos al Final de su vida Útil
- **WLTP:** *Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure* (Procedimiento Mundial Armonizado para Ensayos de Vehículos Ligeros)

INDICE

1-	INTRODUCCIÓN	1
2-	OBJETIVOS	4
3-	IMPACTO AMBIENTAL EN LA INDUSTRIA DEL AUTOMÓVIL	5
3.1.	Materias primas y producción.....	5
3.2.	Contaminación	6
3.2.1.	Legislación	9
3.2.2.	Óxidos de carbono.....	11
3.2.3.	Óxidos de nitrógeno	12
3.2.4.	Hidrocarburos.....	13
3.2.5.	Material particulado.....	13
3.2.6.	Dióxido de azufre.....	14
3.3.	Fase de retiro.....	15
3.3.1.	Legislación	15
3.3.2.	Residuos y reutilización	16
3.4.	Efectos a nivel global	22
3.5.	Efectos sociales.....	26
4-	INTEGRACIÓN EN EL SECTOR DE ENERGÍAS MÁS LIMPIAS	28
4.1.	Tecnologías de reducción de emisiones en vehículos de combustión.....	28
4.2.	Alternativas a los vehículos de combustión	34
4.2.1.	Vehículos eléctricos.....	34
4.2.1.1.	Tipos de EV	35
4.2.1.2.	Baterías.....	35
4.2.1.3.	Impacto.....	38
4.2.2.	Vehículos de hidrógeno.....	40
4.2.2.1.	Pila de combustible	40
4.2.2.2.	Almacenamiento de hidrógeno.....	41
4.2.2.3.	Producción de H ₂ e infraestructuras	43
4.2.2.4.	Ventajas e inconvenientes	44
4.2.2.5.	Comparación vehículo eléctrico y de hidrógeno.....	47
4.2.2.6.	Vehículos pesados de hidrógeno.....	50
4.3.	Utilización de energías renovables para reducir emisiones.....	52
4.3.1.	Eólica	52
4.3.2.	Solar.....	53
4.3.3.	Biomasa	53
4.4.	Perspectiva de evolución del impacto ambiental	54
5-	VISIÓN SOCIAL DEL SECTOR DEL AUTOMOVIL Y PERSPECTIVA DE FUTURO	59
5.1.	Vehículos eléctricos.....	59

5.1.1. Recepción y mercado	59
5.1.2. Problemas de instauración del vehículo	61
5.2. Vehículos de hidrógeno.....	62
5.2.1. Recepción y mercado	62
5.2.2. Problemas de instauración del vehículo	63
5.3. Perspectivas futuras del sector	65
6- IMPACTO AMBIENTAL ASOCIADO A LA SUSTITUCIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE COMBUSTIÓN POR VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO.....	69
6.1. Estimación de la capacidad de hidrógeno.....	69
6.2. Sustitución por FCVs.....	71
6.3. Efectos contaminantes	72
7- CONCLUSIONES	76
8- BIBLIOGRAFÍA	77
9- RECURSOS WEB	83

RESUMEN

Dado el alto nivel de contaminación que presenta el planeta en la actualidad y la reciente preocupación por el estado de este, se requiere un avance en los diversos procesos industriales para la mejor de la calidad del medio ambiente y la salud de su flora y fauna, así como la del ser humano. El sector del automóvil es uno de los que más repercusiones tiene sobre los niveles de contaminación, siendo responsable de aproximadamente el 25% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial a causa de los vehículos de combustión, sin tener en cuenta las emisiones que se producen de forma indirecta al obtener la energía o el combustible requerido por estos.

Este sector ha evolucionado con los años, consiguiendo una notable disminución de emisiones gracias a las distintas tecnologías que se han ido implantando de forma paulatina a lo largo del último siglo y a la aparición de una legislación cada vez más restrictiva en materia de contaminación, como las normas EURO por las que se ven afectados los vehículos diésel y de gasolina. A su vez, el desarrollo de otro tipo de vehículos alternativos como los eléctricos o los basados en la pila de combustible pueden suponer un paso adelante para conseguir un sector sostenible desde el punto de vista medioambiental, especialmente si se combinan con las energías renovables como forma de obtención de energía.

Por otro lado, conseguir una adecuada transición energética conlleva una elevada inversión que podría no resultar del todo rentable, más aún cuando el sector social no termina de apoyar con claridad a los vehículos alternativos debido a diversos lastres como la falta de infraestructuras o sus elevados precios, lo cual conlleva a un ciclo cerrado que dificulta la implantación de los mismos pese a las numerosas ayudas e inversiones que realizan algunos países europeos en estos vehículos, como es el caso de Alemania.

Entre estos vehículos alternativos, el desarrollo del de hidrógeno o de pila de combustible es el más atractivo en la actualidad. Es por ello por lo que conviene analizar a fondo las características de estos vehículos y el coste ecológico que supondría esta transición.

ABSTRACT

Given the high level of pollution that the planet currently presents and the recent concern about its condition, progress is required in the various industrial processes to improve the quality of the environment and the health of its flora and fauna, as well as that of the human being. The automobile sector is one of the sectors that has the greatest impact on pollution levels, being responsible for approximately 25% of CO₂ emissions worldwide due to combustion vehicles, without taking into account the emissions that are produced indirectly by obtaining the energy or fuel required by them.

This sector has evolved over the years, achieving a notable reduction in emissions thanks to the different technologies that have been gradually implemented over the last century and the appearance of increasingly restrictive legislation on pollution, such as the EURO standards that petrol and diesel vehicles are affected. In turn, the development of other types of alternative vehicles such as electric vehicles or those based on the fuel cell can represent a step forward in achieving a sustainable sector from an environmental point of view, especially if they are combined with renewable energies as a way of obtaining energy.

On the other hand, achieving an adequate energy transition entails a high investment that might not be entirely profitable, even more so when the social sector does not end up supporting alternative vehicles clearly due to various burdens such as the lack of infrastructure or their high prices, which leads to a closed cycle that makes their implementation difficult despite the numerous aid and investments made by some European countries in these vehicles, such as Germany.

Among these alternative vehicles, the development of the hydrogen or fuel cell is the most attractive today. That is why it is convenient to thoroughly analyze the characteristics of these vehicles and the ecological cost that this transition would entail

1- INTRODUCCIÓN

El medio ambiente es una de las preocupaciones actuales de la sociedad, dado que la contaminación ha aumentado estrepitosamente desde la revolución industrial causando incontables daños medio ambientales y sociales. Una gran parte de los contaminantes que dañan el medio ambiente en general han sido vertidos por las grandes industrias y las actividades de producción que en ellas se realizan, siendo la industria del automóvil una de estas.

Los automóviles son una parte vital en la sociedad actual en la que nos encontramos y, como tal, una profunda fuente de conflicto debido a los efectos negativos que este sector industrial genera en el medio ambiente y en la sociedad. Según la OMS (Organización Mundial de la Salud), la contaminación atmosférica causa la muerte de siete millones de personas cada año y causa incontables afecciones a la salud, especialmente en el aparato respiratorio (*Ballester Díez et al., 1999*). Desde el punto de vista medioambiental, los vehículos son una fuente importante de gases de efecto invernadero, tales como el CO₂ o los NO_x, por lo que tienen un gran impacto en la destrucción de la capa de ozono y en la alteración de los fenómenos atmosféricos, lo cual provoca diversas catástrofes ambientales. Sin embargo, estos daños ambientales y sociales provocados por los vehículos (entre otros sectores) no son consecuencia única y exclusiva del vertido de emisiones a partir de los tubos de escape, sino que tanto la producción a escala de estos vehículos como el desecho de sus piezas son otra fuente importante que causa esta problemática.

El sector del automóvil es uno de los que más emisiones de gases de efecto invernadero envía a la atmósfera, pues según la OICA (*Organization of Motor Vehicle Manufacturers*) alrededor del 25% de las emisiones totales de CO₂ son vertidas por el transporte, y de estas, el 13% son debidas a turismos y furgonetas utilitarias, tal y como puede apreciarse en la **Figura 1**.

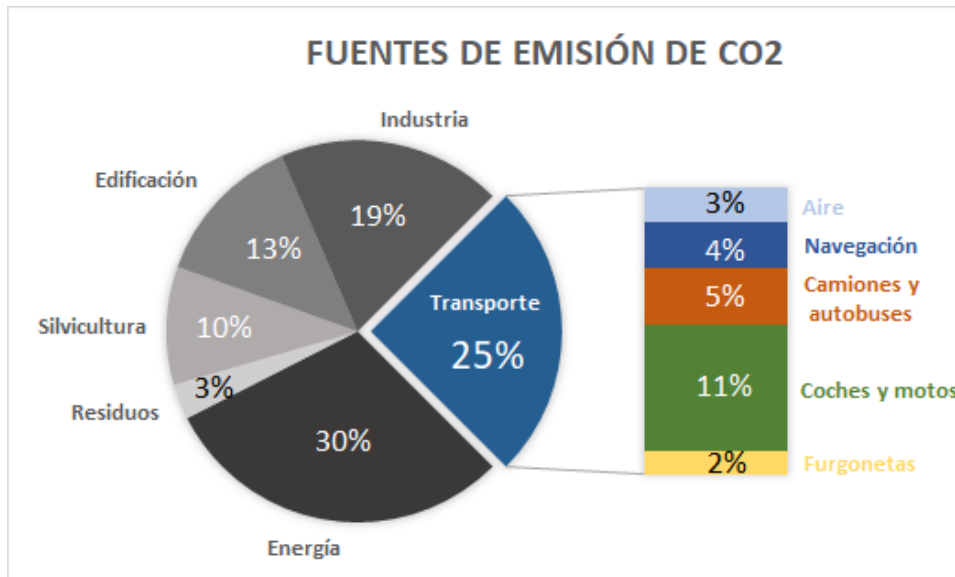


Figura 1: Emisiones de CO₂ vertidas en distintos sectores. El sector del automóvil transporte representa el segundo sector con mayor tasa de emisión y, dentro de este, los coches y las motos son los que más contaminan la atmosfera (Adaptado a partir de los datos proporcionados por OICA)

Aún con estos datos, cabe destacar que el total de emisiones en los vehículos se ha reducido en los últimos años, debido en parte a las duras normativas introducidas en la zona Euro y a los nuevos sistemas desarrollados capaces de eliminar gran parte de las sustancias contaminantes producidas durante la combustión, las cuales se expondrán más adelante. Esta reducción no se ha conseguido únicamente en las emisiones de CO₂, la cual se ha visto mermada en un casi 50% en lo que va de siglo (**Figura 2**), sino que la totalidad de los gases contaminantes emitidos por el tubo de escape de los vehículos se ha visto reducida de forma significativa, consiguiendo con ello la reducción del impacto global causado en el medio ambiente producido por el transporte por carretera.

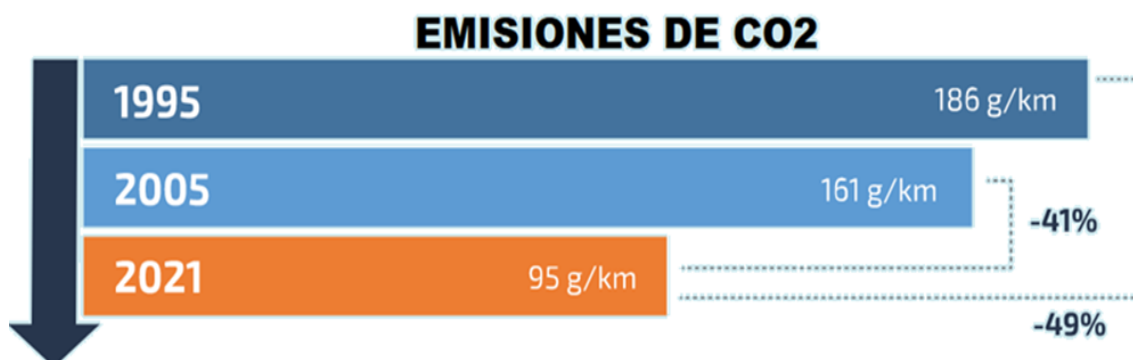


Figura 2: Variación de las emisiones de CO₂ registradas en el periodo indicado, de 1995 a 2021. (Adaptado a partir de los datos proporcionados por OICA)

Pese a la notable mejora en términos de emisiones conseguida en los últimos años, persisten los problemas mencionados anteriormente sobre el medio ambiente y la sociedad. Gran parte de estos problemas están asociados a la enorme dependencia que presenta el sector al uso de derivados del petróleo como combustible. En consecuencia, conviene desarrollar e investigar otro tipo de tecnologías que consigan hacer del sector del automóvil una industria limpia y sostenible, así como la predisposición de la población a colaborar en la consecución de un sector más limpio, aún con el elevado coste económico que dicho cambio puede producir en el bolsillo de los consumidores.

2- OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es mostrar las emisiones contaminantes procedentes de los vehículos de combustión en especial y los problemas añadidos que pueden suponer los residuos de estos en su fase de retiro. Y, ante esto, mostrar las distintas tecnologías existentes o en vista de desarrollarse que pueden provocar un cambio en el sector del automóvil al paliar los efectos nocivos que estos generan sobre el medio ambiente y la sociedad en la actualidad. Así pues, el objetivo primordial de este trabajo es el de hacer una correcta revisión bibliográfica que muestre la situación actual del sector del automóvil en materia de sostenibilidad ambiental, el cual lleva a una serie de objetivos específicos:

1. Mostrar los niveles de contaminación y los efectos que producen en la sociedad y en el medio ambiente, así como la legislación vigente y su evolución a lo largo de los años, de tal modo que sea más sencillo conocer el carácter contaminante de los vehículos según la fecha y su antigüedad.
2. Indicar cómo se espera que evolucione el sector y sus emisiones en los próximos años.
3. Transmitir la opinión social y su disposición a participar en el proceso de transición hacia vehículos más limpios, así como el estado del sector del automóvil en el futuro.
4. Indicar los diferentes métodos o tecnologías desarrolladas que permiten reducir la contaminación en los vehículos actuales, así como la posible utilización de diferentes fuentes de energías renovables para conseguir una mayor eficiencia medioambiental.
5. Hacer una revisión escrupulosa sobre los vehículos eléctricos y comprobar si son realmente viables para alcanzar un sector sostenible en temática medioambiental.
6. El hidrógeno es, en la actualidad, la propuesta más atractiva para conseguir una mayor sostenibilidad ambiental en el sector. En dicho trabajo también se pretende mostrar el coste ambiental asociado a este proceso de cambio, así como mostrar la verdadera eficiencia esperada de lograr dicha transición energética.

3- IMPACTO AMBIENTAL EN LA INDUSTRIA DEL AUTOMÓVIL

La contaminación producida por los vehículos es debida a todo su ciclo de vida (**Figura 3**), desde la obtención de las materias primas hasta la fase de retiro, pasando por su producción y los daños que generan durante su uso.

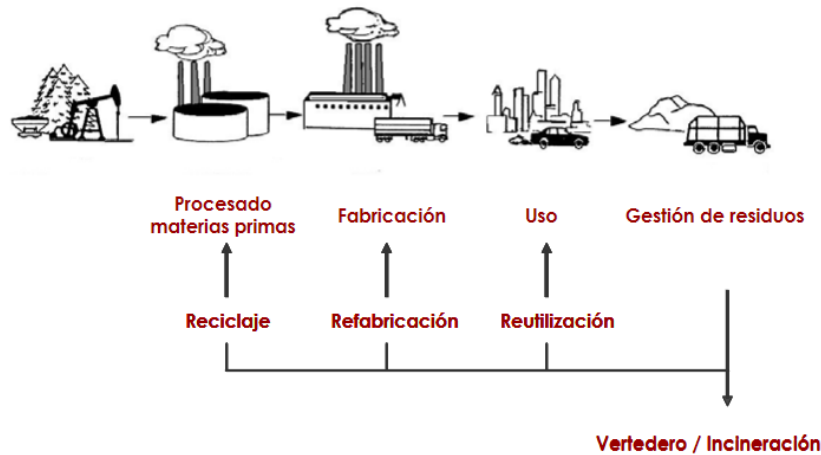


Figura 3: Ciclo de vida de un producto (Viñoles et al., 2014)

3.1. Materias primas y producción

Para entender el impacto ambiental que son capaces de producir los vehículos basta con conocer que sus principales fuentes de energía provienen del petróleo, es decir, tanto el diésel como la gasolina son combustibles derivados del petróleo y, por tanto, recursos no renovables.

Los principales daños producidos en la extracción del petróleo son debidos a la deforestación y a la pérdida del valor ambiental de la zona de extracción. La mayor parte de las explotaciones petrolíferas se encuentran en zonas ocupadas por bosques tropicales, por lo que el establecimiento de la planta petrolífera causa daños irreparables en el ecosistema (Azqueta Oyarzún & Delacámara, 2008). Por otro lado, la perforación del suelo puede causar efectos tan nocivos como el desplazamiento de la fauna, la desaparición de especies e incluso movimientos sísmicos. En petrolíferas marinas, las perforaciones causan un impacto aún mayor en el ecosistema marino, pues los lodos producidos durante el proceso de extracción del petróleo son depositados directamente sobre el lecho marino y la fauna bentónica, causando la completa desaparición de ecosistemas marinos al verse afectada la

base de la cadena trófica. Además, la extracción del petróleo también provoca la emisión de diversos gases contaminantes y un excesivo consumo de energía (Bravo, 2007). Es decir, la extracción del petróleo provoca:

- Destrucción de hábitats.
- Deposición de elementos tóxicos (gases contaminantes y el propio petróleo crudo).
- Introducción del petróleo en la cadena trófica.
- Consumo elevado de energía.

El daño producido también es persistente durante la fase de producción del automóvil, en los cuales se utilizan materiales plásticos, de acero o de aluminio, principalmente; los cuales son modelados utilizando diferentes técnicas que propician el consumo de energía en su calentamiento, enfriamiento y producción (Figura 4) (Álvarez, 2007). Es en la fabricación del vehículos donde se produce las operaciones de fundición y de pintado, en las cuales se considera que se emite aproximadamente un 56% del total de las emisiones producidas en el sector (Viñoles et al., 2014)



Figura 4: Impacto ambiental generado durante todas las fases del ciclo de vida de un vehículo (Elaboración propia)

3.2. Contaminación

Para entender mejor dicho apartado, conviene realizar una breve introducción sobre el funcionamiento de estos vehículos. Los vehículos de combustión son aquellos que presentan

un motor de combustión interna o de explosión, en el cual el combustible es mezclado con oxígeno, produciéndose así una explosión que mueve los pistones, los cuales a su vez moverán el cigüeñal y el sistema de transmisión, generando así tracción a las ruedas que permitirán el movimiento del coche (**Figura 5**). Existen diferentes tipos de motores con diferentes ciclos (dos o cuatro tiempos) que puede ser alimentados con diésel o gasolina. El motor de cuatro tiempos funciona gracias a cuatro sencillos pasos (*Rovira & Muñoz, 2015*):

- Admisión: Las válvulas del cilindro se abren y la mezcla de aire y combustible entran al tiempo que el pistón desciende, separándose del punto muerto superior (PMS).
- Compresión: Las válvulas de admisión se cierran, quedando la cámara de combustión hermetizada. El pistón sube entonces, separándose del punto muerto inferior (PMI) comprimiendo la muestra de tal modo que aumenta la temperatura y estalla.
- Expansión o combustión: En un motor gasolina la bujía generará una chispa en este punto, incendiando así la mezcla de gasolina y provocando un aumento de temperatura y presión que obligarán al pistón a bajar nuevamente, moviendo así el cigüeñal que convertirá la energía en un movimiento rotacional provocando la tracción de las ruedas. En un diésel, la enorme compresión que provocará el pistón será suficiente para lograr este efecto sin necesidad de usar una chispa.
- Escape: Las válvulas vuelven a abrirse y el pistón sube, empujando a los gases generados durante la combustión hacia el exterior a través del tubo de escape.

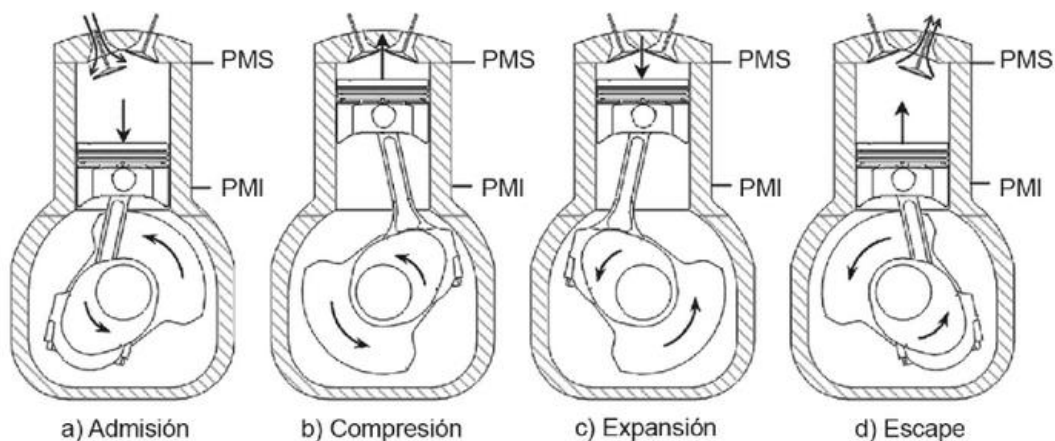


Figura 5: Esquema del funcionamiento de un motor de cuatro tiempos, con las distintas etapas representadas (*Rovira & Muñoz, 2015*)

La principal diferencia entre un motor diésel y gasolina es que el primero funciona gracias a una compresión del aire en la cámara de combustión, generando la temperatura óptima

para la explosión del combustible; mientras que en el segundo se genera una chispa gracias a la mezcla del oxígeno con el combustible. Por tanto, la temperatura de ignición será más alta en un motor de gasolina. El peso es otro factor importante, ya que los motores diésel, al tener que generar una mayor presión, deberán de ser más resistentes y por tanto serán más pesados que los motores de gasolina. Además, el diésel como fluido tiene una densidad mayor que la gasolina, por lo que también lo será su peso. Los Vehículos Eléctricos (EV), por el contrario, son propulsados gracias a la energía contenida en sus baterías. Sin embargo, en este apartado se expondrán únicamente los impactos ambientales asociados a los vehículos de combustión, pues los eléctricos serán expuestos más adelante.

Una vez entendido el funcionamiento básico de un motor y la principal diferencia entre los motores diésel y gasolina, es posible conocer los diferentes gases contaminantes que se producen durante la combustión y sus mecanismos de formación. El aire que entra a un motor está compuesto principalmente por oxígeno y nitrógeno, mientras que el combustible presente en el depósito del automóvil contiene carbono e hidrógeno. Al producirse la mezcla del combustible con el aire para permitir el movimiento del vehículo, tienen lugar una serie de reacciones químicas que darán lugar a una amplia gama de compuestos contaminantes. En un motor de gasolina se produce una mezcla perfecta que va a producir monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos inquemados o no quemados (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x); mientras que en un motor diésel tiene lugar una mezcla más pobre, con un exceso de aire que dará lugar a CO, CO₂, HC, NO_x y materia particulada (MP). Además, en ambos se generará vapor de agua, pequeñas cantidades dióxido de azufre (SO₂) y otros contaminantes en función del tipo de combustible usado, como puede ser el plomo (Pb). Por lo general, en los vehículos modernos, el motor diésel produce una menor cantidad de CO y HC pero una mayor cantidad de NO_x y MP en comparación con el motor gasolina (Darquea, 2018).

Cabe destacar que la cantidad total emitida depende de una amplia gama de factores, como la antigüedad del vehículo, su velocidad, la marcha utilizada, el peso, e incluso la altitud.

3.2.1. Legislación

Para poder conocer mejor el carácter contaminante de los vehículos, es necesario realizar una revisión de las normas europeas y su evolución de cara a mejorar la sostenibilidad del sector.

Con el fin de reducir las emisiones de CO₂, se encuentra el Reglamento (UE) 2019/631 del Parlamento Europeo y del Consejo, el cual deroga anteriores normativas referentes al año 2009 y 2011. Este reglamento se aplica a partir del 1 de enero del 2020, y su finalidad es reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero (CO₂) en vehículos ligeros y turismos para lograr los objetivos establecidos en el Acuerdo de París por los Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). El objetivo principal de dicho reglamento es ir reduciendo las emisiones de CO₂ para contribuir a la meta de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en un 40% para 2030. Para contabilizar los niveles de contaminación, la Comunidad Europea obliga a tomar las muestras de contaminantes a través del ensayo conocido como *Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure (WLTP)*, el cual fue introducido en el Reglamento 2007/715. Este es un método de medida que se realiza con el coche en marcha en distintos tramos y niveles de aceleración, con el fin de complementar los valores obtenidos en el laboratorio y tener así niveles de emisión más realistas.

Sin embargo, las medidas más importantes son las que se han ido implementando a lo largo de los años, las conocidas como normas EURO de emisiones, las cuales surgen a partir de diversas modificaciones cada vez más restrictivas de la Directiva 70/220/CEE, “relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros en materia de medidas que deben adoptarse contra la contaminación del aire causada por los gases procedentes de los motores de explosión con los que están equipados los vehículos a motor”. Estas normas EURO comienzan en 1988, aunque sus restricciones más llamativas comienzan a partir del año 1992 con la norma EURO 1 (**Tabla 1 y 2**).

- En 1992 predominaban los motores gasolina alimentados por el carburador, el cual regula la cantidad de combustible en función de la presión. Se introduce aquí el uso obligado de catalizadores a través de la norma EURO 1 y el uso de la inyección electrónica en los vehículos, de tal modo que se consigue reducir las emisiones de

CO, HC y NO_x (Tzamkiozis et al., 2010). En cuanto a los coches diésel, estos eran de inyección muy pobre, por lo que emitían una cantidad ínfima de CO y HC.

- La norma EURO 2, en 1996, introduce la inyección electrónica multipunto en los motores de gasolina de forma indirecta, lo cual conlleva a seguir reduciendo las emisiones. Los motores diésel imitan esta tecnología, con el uso de un turbocompresor y un catalizador de dos vías que disminuyen el CO y el HC emitido.
- La norma EURO 3, introducida en el año 2000, parte de la misma tecnología. Su principal diferencia es que el acelerador es electrónico, de tal modo que se regula la aceleración para reducir la contaminación. Los motores diésel presentan una sensible disminución de los NO_x y MP gracias a la adición de la EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) y al uso de una bomba electrónica.
- La EURO 4 de 2005 continúa partiendo con esta tecnología, pero esta vez cada inyector tiene su control electrónico independiente de los demás, de tal forma que permite el uso únicamente del combustible necesario en cada momento. Así el vehículo se adapta mejor a las aceleraciones, reduciendo las emisiones y el consumo. Los vehículos diésel vendrían equipados con el turbocompresor, catalizador de dos vías, EGR y un control electrónico individual de cada inyector (*common rail*), así como con el filtro antipartículas (FAP). Gracias al *common rail* se consigue controlar la combustión, reduciendo drásticamente la contaminación y el consumo.
- La norma EURO 5 en 2007 (5b en 2011) introduce la inyección multipunto directa, con el catalizador más cercano al motor para controlar las emisiones a bajas temperaturas. Además, se introduce la EGR para controlar las emisiones de NO_x. Los vehículos diésel, contarán además con trampas de óxidos de nitrógeno (DeNO_x) y dos EGRs de alta y baja presión, ubicadas antes y después del turbocompresor. Todo esto consigue que algunos vehículos registren unos valores de emisiones de escape imperceptibles (cero emisiones) (Fontaras et al., 2014)
- La norma EURO 6 ha ido introduciendo modificaciones desde 2014 hasta 2020. Partiendo del mismo tipo de inyección y del uso de EGR, se introduce el turbocompresor para compensar la reducción de prestaciones que conlleva la adaptación a las normas. El catalizador se encuentra más próximo al motor y se introduce un filtro antipartículas (FAP) tras él. Además, se introduce una inyección electrónica indirecta secuencial que funciona junto con la directa para reducir las

emisiones. Por último, se introduce el catalizador SCR (Reducción Catalítica selectiva) con *AbBlue*, que reduce notablemente las emisiones de NO_x. Además, los vehículos diésel presentan un *common rail* que divide la inyección en más ciclos. Es durante el periodo de esta normativa en el que se realizan las pruebas WLTP, arrojando resultados más realistas sobre las emisiones contaminantes gracias a los Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones (PEMS) (Weiss et al., 2012).

Tabla 1: Comparación de los límites de emisiones en vehículos de gasolina en función de las distintas normas EURO (Elaborado a partir de los datos de la normativa europea)

TURISMOS GASOLINA	FECHA	CO (g/km)	HC (g/km)	HC + NO _x (g/km)	NO _x (g/km)	MP (ppm)
EURO 1	jul-92	2,72	-	0,97	-	-
EURO 2	ene-96	2,2	-	0,5	-	-
EURO 3	ene-00	2,3	0,2	-	0,15	-
EURO 4	ene-05	1	0,1	-	0,08	-
EURO 5	sep-09	1	0,1	-	0,06	0,005
EURO 6	sep-14	1	0,1	-	0,06	> 0,005

Tabla 2: Comparación de los límites de emisiones en vehículos diésel en función de las distintas normas EURO (Elaborado a partir de los datos de la normativa europea)

TURISMOS DIÉSEL	FECHA	CO (g/km)	HC (g/km)	HC + NO _x (g/km)	NO _x (g/km)	MP (ppm)
EURO 1	jul-92	2,72	-	0,97	-	0,14
EURO 2	ene-96	1	-	0,7	-	0,08
EURO 3	ene-00	0,64	-	0,56	0,5	0,05
EURO 4	ene-05	0,5	-	0,3	0,25	0,025
EURO 5	sep-09	0,5	-	0,23	0,18	0,005
EURO 6	sep-14	0,5	-	0,17	0,08	0,005

Así pues, el conocimiento de estas normas es suficiente para conocer los niveles de emisión de los vehículos en cada fecha, pues estos debían de ser producidos bajo estos estándares. Una vez entendido el contenido de las normas EURO, conviene conocer con más detalle las principales sustancias implicadas (**Tabla 3**) y sus mecanismos de formación.

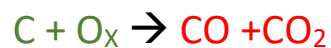
3.2.2. Óxidos de carbono

Tal y como se comentaba anteriormente, el CO y el CO₂ son dos de los principales contaminantes emitidos a la atmósfera desde un vehículo. En motores de gasolina, el CO

predomina como elemento con mayor toxicidad para el medio, proviniendo en su totalidad del tubo de escape.

El CO se genera como consecuencia de la combustión incompleta del combustible, de tal modo que, debido a la escasez de oxígeno, el carbono no puede oxidarse al completo para dar lugar a CO₂. Es decir, siempre y cuando se produzca una combustión total se producirá CO₂, pero si la reacción presenta déficit de oxígeno se producirá CO, elemento mucho más tóxico. Por tanto, valores altos de CO indican una mala combustión. En los motores diésel no se sigue esta regla, pues estos generan una menor cantidad de CO gracias a que las mezclas son muy pobres (*Darquea, 2018*).

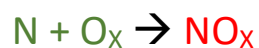
Por el contrario, el CO₂ no es un gas tóxico, por lo que siempre se busca su formación en lugar de la de CO, debido a que niveles altos de CO₂ indican el correcto funcionamiento de un motor, siendo así un excelente indicador para la eficiencia del vehículo.



La cantidad de CO y CO₂ producida en la reacción depende de la cantidad disponible de oxígeno.

3.2.3. Óxidos de nitrógeno

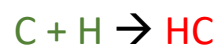
En los motores de combustión, el NO es el elemento que predomina de estos óxidos. Se produce debido a una oxidación del nitrógeno a elevadas temperaturas, que puede dar lugar a NO₂ si hay un exceso de aire que oxide el NO. Es por ello por lo que los niveles de emisión de NO_x son menores en motores de gasolina que en diésel, donde los procesos de oxidación son más probables. Estos compuestos son de gran peligrosidad, pues están muy relacionados con los niveles de contaminación global, con la destrucción de la capa de ozono y con la formación de otros compuestos nocivos (*Miller et al., 2017*).



Estas reacciones tienen lugar en el escape, siendo este el responsable de las emisiones de NO_x.

3.2.4. Hidrocarburos

Los elementos responsables de la formación del CO₂ y el vapor de agua producidos pueden provocar otros contaminantes cuando la reacción presenta déficit de oxígeno, como es el caso de los hidrocarburos. En una mezcla rica, en la que no hay suficiente aire, el combustible no podrá quemarse en su totalidad y producirá estos hidrocarburos junto con el CO. Cuando la quema del combustible es total esto no ocurre, ya que el carbono reaccionará con el oxígeno para formar CO₂ y con el hidrógeno para formar vapor de agua. Por lo general, las cantidades de HC son inferiores a las de otros contaminantes, y se corresponden principalmente al benceno, tolueno y xileno (G.-S. Zhang et al., 2008).



Al producirse una mezcla más rica, los motores de gasolina emiten una mayor cantidad de estos hidrocarburos, aunque las diferencias son pequeñas con respecto al diésel. Su emisión también viene asociada a una falta de temperatura en determinadas piezas del motor, como el pistón o los cilindros, que pueden no alcanzar la suficiente temperatura como para quemar los compuestos. Pese a la implicación de estos elementos, el escape sigue siendo la principal fuente de emisión de hidrocarburos.

3.2.5. Material particulado

El material particulado emitido en motores de gasolina es insignificante, siendo problema directo de los motores diésel. Estas partículas son debidas a diversos motivos, principalmente al uso de aditivos en el combustible y al estado mecánico del vehículo. El material particulado puede ser de distinta naturaleza (plomo o sulfatos). Durante la combustión, debido a las altas temperaturas y presiones que se alcanzan en los vehículos diésel, los HC pueden romperse y deshidrogenarse, quedando así carbono libre. Por otro lado, otros sólidos (como el plomo o el azufre) son producidos como consecuencia del enfriamiento de diversos compuestos oxidados, ocurriendo a bajas revoluciones por minuto

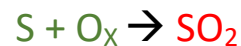
(RPM). Por tanto, las mayores emisiones de MP tienen lugar con el motor frío y en trayectos urbanos (Díaz & Soto, 2019).



Este carbono puede reaccionar con estos otros sólidos producidos, generando así el material particulado o el conocido como hollín. La peligrosidad de estas partículas radica en su composición y tamaño.

3.2.6. Dióxido de azufre

El dióxido de azufre se genera como consecuencia de la oxidación del azufre presente en el combustible. Estas emisiones son unas 2-3 veces superiores en vehículos diésel respecto a los de gasolina, lo cual es debido una vez más a la mayor ocurrencia de procesos de oxidación que en los diésel se producen (Nurrohim & Sakugawa, 2005).



Aunque las emisiones son pequeñas, cabe destacarlas debido a los problemas ambientales y en la salud humana que estos compuestos pueden generar.

Tabla 3: Comparación de las emisiones de los distintos contaminantes principales de un vehículo. Los vehículos diésel presentan un mayor carácter contaminante (Elaboración propia)

CONTAMINANTE	GASOLINA	DIÉSEL
CO	>	<
CO ₂	>	<
NO _x	<	>
HC	≈	≈
MP	<	>
SO ₂	<	>

3.3. Fase de retiro

La UE tiene como claro objetivo el reciclaje, la reutilización y la recuperación de los vehículos al final de su vida útil (VFU). Para ello, sus directrices van encaminadas a prevenir y limitar los residuos de los VFU y de todos sus componentes con el fin de conseguir un mejor rendimiento ambiental en todas las partes implicadas en el ciclo de vida de un vehículo. Esta es una tarea complicada debido a la enorme cantidad y peligrosidad de residuos generados por vehículos, tanto al final de su vida útil como debidos a su mantenimiento.

3.3.1. Legislación

La actual ley vigente respecto a la fase de retiro de los vehículos es la Directiva (UE) 2018/849 del Parlamento Europeo, “por la que se modifican la Directiva 2000/53/CE relativa a los vehículos al final de su vida útil, la Directiva 2006/66/CE relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores y la Directiva 2012/19/UE sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos”. En dicha ley se marcan las directrices para el desguace de los vehículos, la correcta eliminación de sus residuos, las concentraciones máximas de las distintas sustancias permitidas y los requisitos de su desmontaje, reutilización y reciclado; con el fin de reducir las repercusiones causadas en el medio ambiente debido al trato que reciben los VFU para conseguir la adecuada protección, conservación y mejora de la calidad ambiental y la conservación energética; de modo que el sector se vea encaminado hacia una economía circular (*Elliott et al., 2019*).

La primera regla para cumplir estos objetivos es la prevención, de tal modo que se les exigirá a los Estados miembros que fomenten la prevención de residuos mediante medidas que impulsen la utilización de sustancias menos peligrosas. Por otro lado, los VFU sufrirán la pérdida de todos sus componentes y/o materiales para realizar con ellos los tratamientos pertinentes de eliminación de residuos, de modo que se mitigue lo máximo posible su impacto ambiental. Para ello, los VFU serán entregados en centros autorizados de tratamiento. Los residuos peligrosos se han de retirar de forma selectiva. En cuanto a la reutilización y el reciclado de las piezas, el objetivo de dicha ley es el de aumentar estas operaciones, de modo que los vehículos homologados “sean reutilizables y/o reciclables en un mínimo del 85 % del peso de cada vehículo y reutilizables y/o valorizables en un mínimo del 95 % del peso de cada vehículo”.

Los vehículos en paradero desconocido son un gran obstáculo para conseguir estos objetivos. En 2017, para los 3,8 millones de vehículos europeos tomados como referencia en la **Figura 6**, se estima que el contenido de refrigerante contenido en estos vehículos asciende aproximadamente a 630 toneladas. Si este se libera al medio ambiente, se produciría un efecto equivalente al vertido de 900.000 toneladas de CO₂, siendo por tanto un gran factor de enorme potencial de calentamiento global (*Kitazume et al., 2020*)

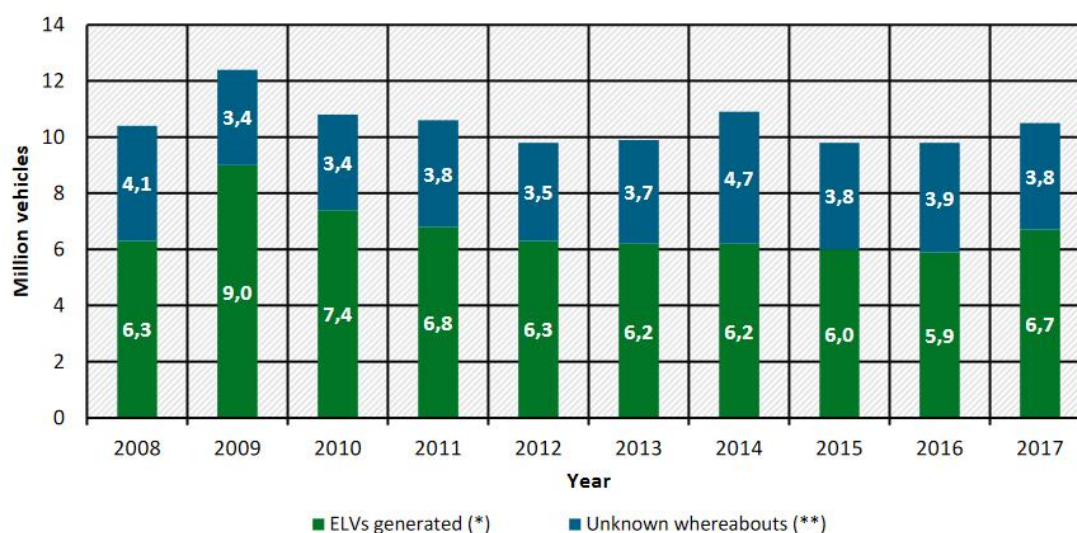


Figura 6: Vehículos que llegan al final de su vida útil (ELVs) y en paradero desconocido originados en la UE durante el periodo de años mostrado (*Kitazume et al., 2020*)

3.3.2. Residuos y reutilización

El sector del automóvil presenta unas altas tasas de reciclaje, de tal modo que solo una pequeña porción queda sin reutilizarse. Cuando los vehículos llegan a los Centros de Tratamiento Autorizados (CAT), se produce la extracción de todos los elementos peligrosos para el medio ambiente, los cuales serán entregados posteriormente a gestores autorizados para su gestión. Por otro lado, se extraerán piezas del vehículo que permitirán recambios y reparaciones en otros que se encuentren en uso. El resto del vehículo será enviado a una instalación de fragmentación en la que se recuperaran los distintos materiales para ser reciclados. Los de poder calorífico alto podrán formar un combustible derivado de residuos. Esta energía y las materias primas recuperadas servirán para formar nuevos productos y vehículos (*Stahel, 2016*).

Cabe destacar que los residuos generados por los automóviles no se deben solo a los que se producen al final de su vida útil. Los cambios de aceite, neumáticos o incluso de determinadas piezas de la carrocería del vehículo son acciones que se realizan durante la vida útil del mismo. Las altas cantidades de estos elementos supone un grave riesgo para el medio ambiente, pues existe la posibilidad de que se acumulen en vertederos de forma incontrolada o de que no sean tratados de la forma adecuada, produciendo así una alta cantidad de contaminantes. La carrocería de los vehículos puede estar formada por una amplia gama de productos, como hierro, acero, metales no ferrosos, plásticos, vidrio, etc. Por lo tanto, los desechos sólidos suponen una amplia fuente de contaminación. El acero es el principal componente de los vehículos, siendo el responsable de aproximadamente el 70% de su masa (Yue, 2012). El acero forma parte de la chatarra junto con otros metales no ferrosos como el aluminio, el cobre y el magnesio; los cuales resultan difíciles de recuperar. El caucho y el vidrio, por lo general, se apilan para su incineración provocando así la contaminación de la atmósfera.

El modelo de gases de efecto invernadero, emisiones reguladas y uso de energía (GREET por sus siglas en inglés) evalúa las emisiones asociadas a la recuperación y producción de materiales del vehículo, a la fabricación de sus componentes y a la eliminación y reciclado del vehículo. Este modelo determina que el vehículo tipo de combustión interna está formado por una composición media ajustada a la indicada en la **Tabla 4**:

Tabla 4: Composición de materiales promedio de un vehículo de combustión (Elaborada a partir de datos de Yue, 2012)

MATERIAL CONVENCIONAL	MODELO AJUSTADO (% EN PESO)
Acero	73,4%
Hierro	4,6
Aluminio forjado	2,2
Aluminio moldeado	4,7
Cobre	1,9
Magnesio	0,02
Vidrio	2,9
Plástico	7,2
Goma	2,4
Platino	0,0005
Otros	0,8

El principal problema de la industria del automóvil es que históricamente los vehículos han sido diseñados para tener un único uso, pues nunca fueron contemplados para ser reciclados. Sin embargo, la adopción de la economía circular y de las nuevas tecnologías en la industria del automóvil han propiciado una menor generación de la tasa de residuos como consecuencia de la reutilización de estos materiales (**Figura 7**) (Bellmann & Khare, 2000).

- Metales férricos y no férricos:

Aunque el hierro y el acero son los componentes principales de la carrocería, la utilización de aluminio ha aumentado de forma significativa en los últimos años. Este elemento localizado principalmente en las llantas, cilindros y otras partes del motor es fácilmente reutilizable, por lo que prácticamente se cierra su ciclo. Por otro lado, la chatarra es un producto que se comercializa en grandes cantidades a nivel internacional y que reduce el consumo de energía durante la fundición en hasta un 70% al presentar una menor cantidad de hierro. En cuanto al cobre contenido en las distintas partes del motor y en el cableado, su reciclado permite un ahorro de energía del 85% (Amza et al., 2011).

- Vidrio:

Conforman los parabrisas del vehículo, principalmente. Son fácilmente reciclables para producir las lunas de nuevos vehículos siempre que el vidrio no vaya junto con otros metales que dificulten el proceso de reciclado. Sin embargo, aunque es un material 100% reciclable, no se suele cumplir ese porcentaje de conversión debido a sus bajos precios de mercado.

- Plásticos:

Por lo general, son en su mayoría reciclables. El problema radica en que en los vehículos los plásticos son de distintos tipos de materiales que pueden hacerlos incompatibles entre sí, dificultándose su reciclaje. Es por ello por lo que conviene separarlos en función del código ISO, pues según el tipo de plástico seguirá un tratamiento u otro. Los componentes plásticos más comúnmente presentes son poliuretano, polipropileno, polietileno y PVC (policloruro de vinilo), los cuales conforman las partes de la carrocería y del interior del vehículo (*Ragosta et al., 2000*).

- Neumáticos:

Es uno de los componentes que pueden suponer un mayor peligro para el medio ambiente, pues su quema emite altas cantidades de CO₂ y Pb entre otros gases. Sin embargo, existe un estricto control sobre la gestión de los neumáticos, contando con un alto índice de reciclado y con una gran variedad de aplicaciones del caucho, como su uso en suelos, jardines, etc (*Zarini, 2010*).

- Baterías:

Los vehículos de combustión convencionales presentan baterías de plomo-ácido que actúa como batería de arranque, las cuales deberán de neutralizarse para su correcto reciclado. Su principal problema desde el punto de vista medioambiental consiste en la generación de desechos de plomo, un elemento altamente tóxico que causa daños irreversibles en los organismos, debido principalmente a su carácter acumulativo. Por ello, el control de los efluentes líquidos y de las emisiones de partículas en las plantas de tratamiento de baterías deben de realizarse en base a las normativas específicas, pues una actividad incorrecta puede producir una elevada contaminación por plomo en los suelos adyacentes a la planta de reciclaje (*Cala & Kunimine, 2003*).

- Fluidos:

Se hace referencia aquí a los aceites, refrigerantes, líquido de frenos, etc., los cuales deben de separarse para conseguir una chatarra más limpia y fácil de tratar. Tiene un alto potencial contaminante para las aguas y suponen la primera fase en el proceso de descontaminación de los vehículos, pues estos fluidos pueden escapar de los VFU con facilidad. Estos son almacenados en instalaciones para residuos peligrosos. Cabe destacar que la liberación de refrigerantes formados por compuestos nocivos para el medio ambiente está prohibida por la legislación de gran parte de los países europeos, entre ellos España.



Figura 7: Esquema que muestra los caminos que siguen los diferentes desechos de los VFU (Elaboración propia)

Tal y como se ha podido comprobar, los VFU son una de las fuentes de deshechos más importantes a nivel mundial. Se han realizado varios intentos para predecir los volúmenes, controlar la generación y gestionar estos desechos de la manera más eficiente. Las principales tareas involucradas en lograr un sector más sostenible son el desarrollo de prácticas de economía circular, el progreso tecnológico y las directivas enfocadas a todas las fases del ciclo de vida de los vehículos. Por lo general, en Europa los países realizan un alto desempeño en estas tareas, por lo que se consiguen buenos porcentajes de reciclaje (D'Adamo et al., 2020).

Mediante el modelo GREET visto anteriormente es posible calcular el consumo de energías y emisiones en diferentes escenarios de reciclaje. La **Figura 8** muestra la reducción de consumo de energía según diferentes proporciones de reciclaje. Aunque el reciclaje provoca un mayor consumo de gas natural, se produce un ahorro considerable de otras fuentes de energía basadas en el carbono, las cuales son más contaminantes en comparación.

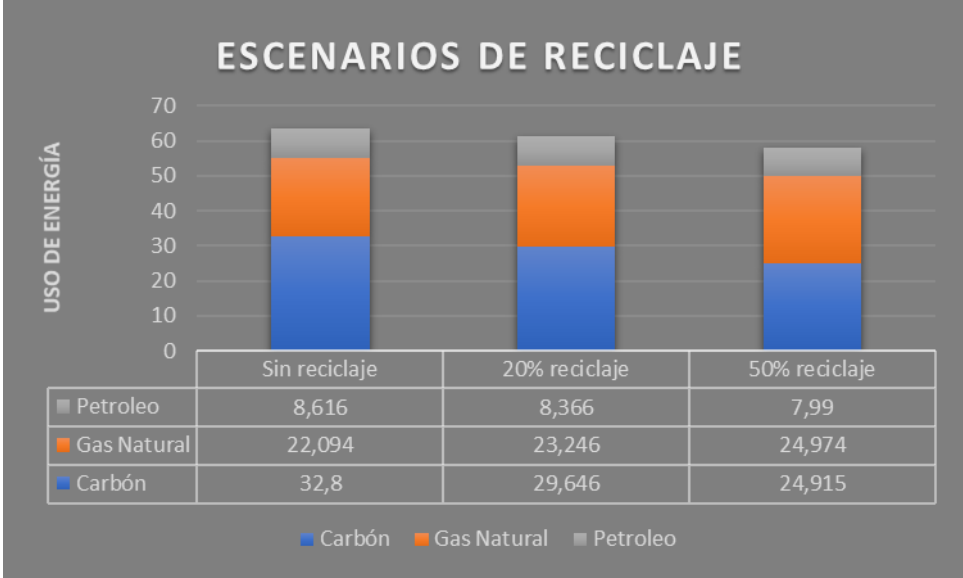


Figura 8: Uso de energía en diferentes escenarios de reciclaje (Elaborado a partir de datos de Yue, 2012)

Esta reducción en el consumo de energía conlleva a la reducción de las emisiones de las diferentes sustancias contaminantes involucradas, tal y como se puede observar en la **Figura 9:**

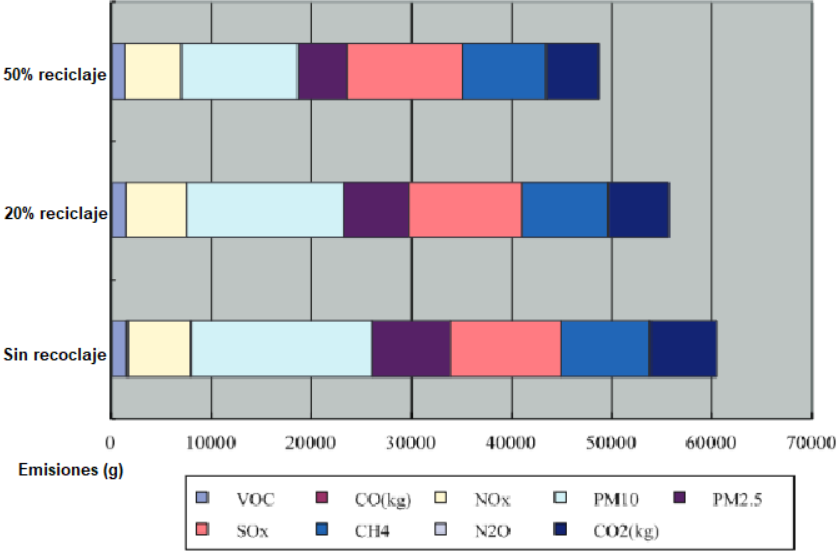


Figura 9: Emisiones de contaminantes en diferentes escenarios de reciclaje (Yue, 2012)

Actualmente los valores de reciclaje son muy superiores, pues en 2016 se reciclaron un 77% en peso de los vehículos que llegaban al final de su vida útil y se espera que llegue al 89% para 2030, lo que ha convertido al sector en un ejemplo de aplicación de la economía circular (D'Adamo et al., 2020). La industria del automóvil es, por tanto, un sector puntero en materias de reciclaje.

3.4. Efectos a nivel global

El aire en la troposfera es una mezcla fundamentalmente de gases cuya composición se considera prácticamente constante, constituida principalmente por nitrógeno, oxígeno, argón y dióxido de carbono, los cuales representan un 99,99% del volumen seco total. Cuando se altera esta composición o se incorporan sustancias capaces de alterar la composición normal de la atmósfera y crear un comportamiento anómalo, ya sea por gases, vapores o materia particulada; se dice que la atmósfera está contaminada. Casi todas las especies consideradas contaminantes pueden tener un origen natural o antropogénico y, aunque en términos absolutos su valor supera al de los contaminantes de origen antropogénico, es evidente que los problemas de contaminación atmosférica más importantes son producidos por la contaminación antropogénica, tanto por suponer un añadido como por darse de manera más localizada. De la contaminación antropogénica total, se estima que aproximadamente un 80% es consecuencia de la utilización de combustibles fósiles, cuya quema genera CO₂, CO, SO₂, NO_x, MP, etc.

Desde el punto de vista de la contaminación emitida directamente a la atmósfera desde el tubo de escape de un coche, no solo es de importancia las sustancias contaminantes que son vertidas, sino también las transformaciones que pueden producir en las diferentes capas de la atmósfera, alterando la composición normal de gases del entorno. Son por tanto responsables de las emisiones de contaminantes primarios (emitidos directamente desde el tubo de escape) y secundarios (producidos por la reacción de los gases emitidos). Las emisiones primarias son las que deben de tratarse desde el foco emisor.

Los problemas medioambientales causados por el sector del automóvil son debidos las operaciones realizadas durante la creación del automóvil, a las altas emisiones producidas por los vehículos y a los compuestos nocivos que pueden depositarse en el medio como

consecuencia su abandono, reparación y desechado. Tal y como se ha indicado a lo largo del presente trabajo, las consecuencias globales son fomentadas como consecuencia de todo su ciclo de vida, desde su producción hasta su retirada.

- Efecto invernadero y calentamiento global.

El efecto invernadero hace referencia al mecanismo por el cual se produce el calentamiento de la Tierra. En condiciones normales la atmosfera retiene únicamente un 20% de la energía solar, otro 30% es reflejado por la superficie terrestre (albedo) y el 50% restante es retenido en la superficie terrestre, calentándola. Esta energía que calienta la superficie terrestre es emitida nuevamente hacia la atmosfera a modo ondas infrarrojas, las cuales son absorbidas por gran cantidad de gases contaminantes, como el CO₂, que absorbe esta energía impidiendo que escape al exterior y produciendo así el efecto invernadero. El CO₂ no es el único responsable. Los CFCs (Clorofluorocarburos) utilizados como refrigerantes de los coches tienen una capacidad aun mayor para retener el calor. A su vez, los óxidos de nitrógeno emitidos son capaces de reaccionar en la atmosfera con otras sustancias, alterando la composición de la atmosfera y provocando reacciones indeseadas. La **Figura 10** muestra la variación de la temperatura media anual con respecto a los niveles preindustriales, la cual ratifica que el aumento de la temperatura del planeta y el efecto invernadero son consecuencia directa de las emisiones de estos gases.

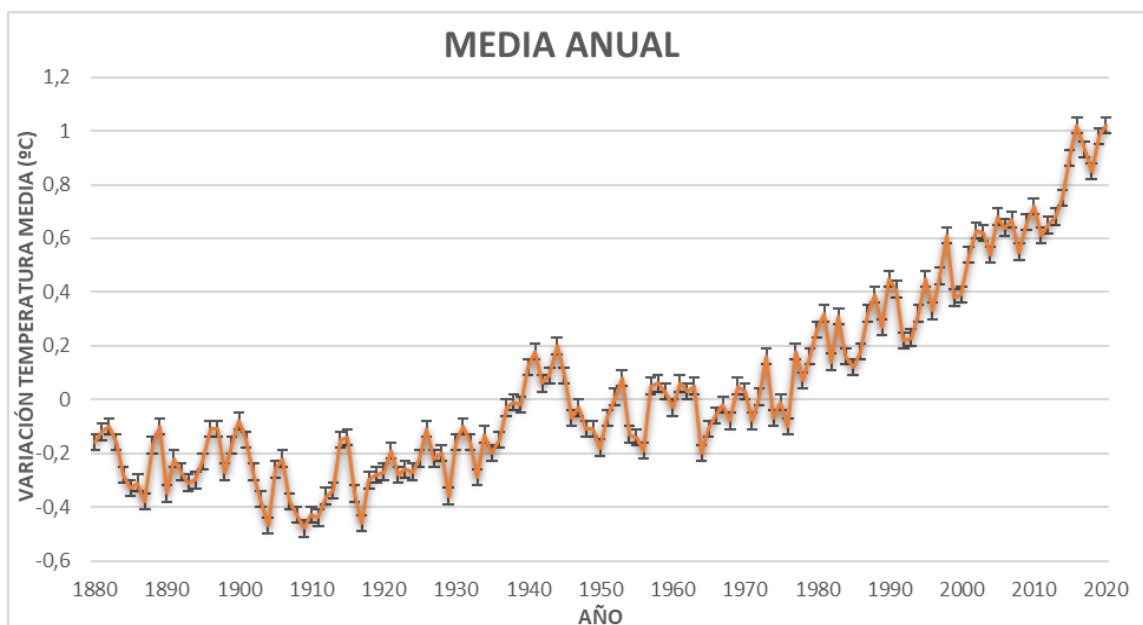


Figura 10: Variación de la temperatura media del planeta con respecto a los niveles preindustriales (1850). Las emisiones de gases de efecto invernadero ha provocado el aumento de la temperatura en más de un grado desde entonces (Elaboración propia a partir de datos de NASA)

La contribución de los gases de efecto invernadero al calentamiento global varía en función de los compuestos que los conformen, pues variará su capacidad para retener el calor y su tiempo de permanencia en la atmosfera. A través del potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés), es posible conocer como de contribuyentes son estas sustancias al efecto invernadero (*Galante Marcos, 2011*). La **Tabla 5** muestra el GWP de las sustancias reguladas por el protocolo de Kioto para un horizonte temporal de 100 años.

Tabla 5: GWP de las sustancias reguladas por el protocolo de Kioto (*Galante Marcos, 2011*)

GAS	FÓRMULA	GWP (100 AÑOS)
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	21
Óxido nitroso	NO _x	310
Refrigerantes	PFC, CFC y SF ₆	6500-23900

El CO₂ representa el valor más bajo, existiendo otros gases contaminantes mucho más nocivos. Es el caso de los NO_x y de los refrigerantes. Las medidas tomadas en los últimos años con las normas Euro que restringen las emisiones de NO_x y las normas de los diferentes países que prohíben el uso de refrigerantes que contengan sustancias con un determinado GWP suponen un gran paso en el sector en su afán para ser una industria sostenible.

- Alteración de los niveles de ozono.

El ozono troposférico resulta nocivo para el ser humano. Sin embargo, en la estratosfera, resulta beneficioso debido a la formación de la capa de ozono, que actúa a modo de filtro de la radiación recibida por parte del sol. La química de la formación de ozono (O₃) y su descomposición es compleja y está impulsada por la energía solar, considerándose así un contaminante fotoquímico. Los principales agentes contaminantes que influyen en las reacciones de formación del ozono son los NO_x y los CFCs (*Ball et al., 2018*). El NO₂ puede absorber eficientemente la luz solar y disociarse, produciendo oxígeno atómico y NO. El oxígeno atómico puede reaccionar con el O₂ para formar O₃. Por otro lado, el NO emitido puede reaccionar rápidamente con el O₃ para formar NO₂ y O₂, produciéndose así la descomposición del ozono (reacción de titulación). En un estado de equilibrio, las concentraciones de ozono se ven reguladas por las cantidades relativas de NO₂ y NO, así

como por la intensidad solar. Este estado se está viendo alterado por la presencia de otros contaminantes como los compuestos orgánicos volátiles (COV), que reaccionan con el NO para producir NO₂ sin que se consuma ozono, perturbando así la reacción de titulación. El resultado neto de estas reacciones es que se forma más de una molécula de ozono por cada molécula de COV degradada. En las ciudades, como hay formación de contaminantes frescos, se consume el ozono dado que el NO se convierte en NO₂. Fuera de las ciudades el NO₂ se acumula, absorbe la radiación solar, se fotodisocia y da el radical oxígeno, el cual reaccionará con el oxígeno molecular para formar ozono. La reducción de las emisiones de NO_x por parte de los vehículos son de gran influencia para evitar la ruptura del ozono. Sin embargo, los CFCs resultan aún más peligrosos debido a que los átomos de cloro que contienen pueden permanecer en la atmósfera destruyendo alrededor de 1000 moléculas de O₃.

- Lluvia ácida.

Aquí influye el azufre contenido en los refrigerantes y combustibles y el nitrógeno emitido a la atmósfera (**Figura 11**). Estos se hidrolizan para formar ácidos nítricos y sulfúricos, los cuales precipitaran en forma de lluvia ácida. Esta lluvia cause graves afectaciones en los suelos que sufren un proceso de meteorización lento y en las aguas de estanques y lagos, causando el desplazamiento de la fauna asociados a ellos.

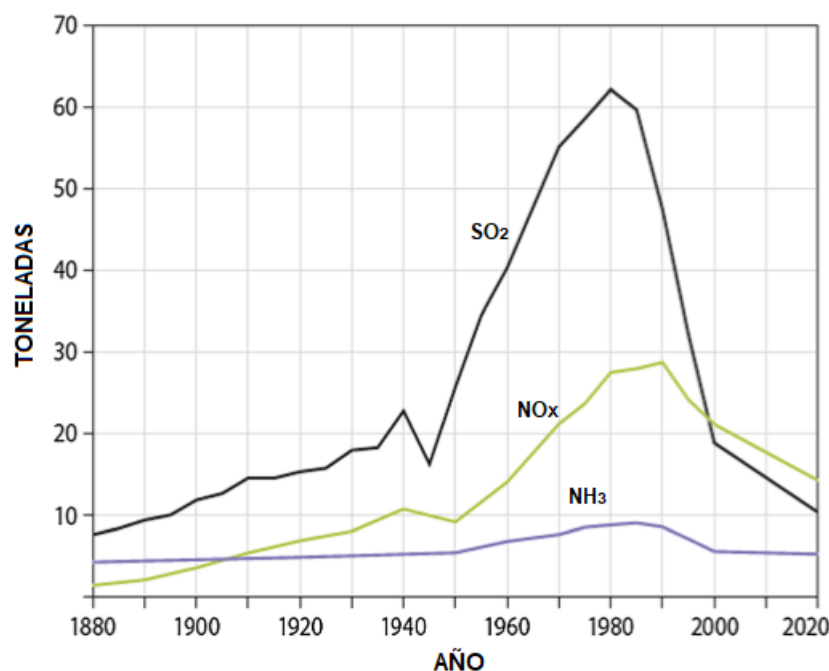


Figura 11: Emisiones europeas de SO₂, NO_x y NH₃ en la ventana temporal 1880-2020 (Grennfelt et al., 2020)

- Efectos sobre la biosfera y la biodiversidad.

Los problemas generados en la biodiversidad tienen su origen en la propia extracción de las materias primas, un proceso que provoca la destrucción de selvas tropicales y de numerosos ecosistemas. El calentamiento global, la destrucción de la capa de ozono y la lluvia ácida tiene un efecto perjudicial sobre la biosfera, causando la degradación de los hábitats y el envenenamiento de los ecosistemas naturales, lo cual conlleva al desplazamiento y a la extinción de especies florísticas y faunísticas que pueden producir una pérdida en cadena del valor ecológico (*Lovejoy, 2006*). Algunos ejemplos son la destrucción de las grandes masas de hielo como consecuencia del efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono, la desaparición de bosques como consecuencia de la lluvia ácida o la pérdida de arrecifes y fitoplancton marino, los cuales son grandes consumidores de CO₂.

3.5. Efectos sociales

Los principales efectos producidos por la existencia de los automóviles son los problemas asociados a afecciones respiratorias, a la contaminación acústica y a la pérdida de zonas verdes y elementos naturales, lo cual a su vez se traduce en una mayor concentración de gases contaminantes. Otro grave problema que afecta a los monumentos de las ciudades es el conocido como mal de piedra, causado por el azufre. Además, el ruido generado por los vehículos es otro agente nocivo que produce efectos sociales adversos, provocando molestias en el 36% de la población (*Alonso, 2003*).

Según el informe de calidad del aire de la Agencia Europea del Medioambiente (EEA por sus siglas en inglés) a comienzos de siglo se producían en el continente europeo 477.000 muertes prematuras a causa del material particulado, 120.000 debidas al NO₂ y 17.000 debidas al ozono troposférico. El dióxido de azufre provoca una disminución de las protecciones del sistema respiratorio, pudiendo provocar muertes por una rotura masiva de los capilares sanguíneos; el monóxido de carbono compite con el oxígeno en la sangre, de tal modo que bloquea la hemoglobina; el material particulado puede provocar distintos tipos de cáncer; los CFCs producen alteraciones en el sistema respiratorio; el NO puede causar una vasodilatación excesiva que radica en la muerte por shock; y el NO₂ disminuye la función pulmonar (**Tabla 6**).

Tabla 6: Afectaciones de los principales contaminantes a la flora y fauna (Pardos, 2006)

CONTAMINANTE	EFFECTOS EN PERSONAS Y FAUNA	EFFECTOS EN FLORA
Ozono	Vasodilatación e irritación	Estrés oxidativo y alteración de la permeabilidad, del metabolismo y de la regulación osmótica
Nitrógeno	Toxicidad directa	Movilización de elementos tóxicos, alteraciones en el crecimiento, disminuye relación tallo/raíz
CFC	Alteración de comunidades e irritación	Alteración de comunidades
Azufre	Irritación y afecciones pulmonares	Necrosis o lesiones crónicas
Metales pesados	Intoxicación, riesgo de padecer ciertas enfermedades	Disminución de clorofila y alteraciones en el crecimiento

No obstante, en la última década se ha conseguido reducir las muertes a causa del NO₂ en un 54%, en parte gracias a las medidas adoptadas en el sector del automóvil a través de las normas EURO.

4- INTEGRACIÓN EN EL SECTOR DE ENERGÍAS MÁS LIMPIAS

Dados los problemas ambientales y sociales producidos como consecuencia del uso de vehículos de combustión, conviene realizar la búsqueda e instauración de otras alternativas más limpias y seguras; así como disminuir el impacto ambiental de los vehículos convencionales mediante diversas tecnologías que les permitan cumplir los estándares impuestos por las normas EURO.

4.1. Tecnologías de reducción de emisiones en vehículos de combustión

Con el fin de reducir el impacto ambiental que causan los vehículos convencionales, los vehículos modernos, y en especial los motores diésel, están implantando desde hace unos años una serie de dispositivos con el fin de cumplir con los estándares alcanzados en las normas EURO y reducir los vertidos a la atmósfera. La búsqueda de nuevos dispositivos de este tipo resulta de interés con el fin de reducir las emisiones y facilitar así una correcta optimización del sector del automóvil, e incluso podría servir como base para la transición hacia otros tipos de vehículos más respetuosos con el medio ambiente, como los eléctricos o los Vehículos de Pila de Combustible (FCV).

- EGR:

Este sistema es muy utilizado en la actualidad debido al endurecimiento de las normas de emisión, ya que es un muy buen método para reducirlas, pues se consigue recircular los gases del tubo de escape hacia un colector de admisión que reduce las emisiones de NOx. El funcionamiento de la EGR varía levemente dependiendo del tipo de motor, pero en general es un método que cumple su función bastante bien tanto en motores diésel como gasolina. Los gases de escape se extraen justo después de los cilindros y vuelven a mezclarse con el aire de la aspiración gracias a la válvula EGR (**Figura 12**) (*Lopatin, 2020*). Esto provoca una menor entrada de oxígeno a los cilindros, y por lo tanto una temperatura de combustión más baja. Esta reducción de la temperatura es la responsable de reducir en torno a un 50-70% las emisiones de NOx y de hidrocarburos, lo a su vez provoca una menor formación de ozono troposférico, el cual es un agente sumamente nocivo. Además, en coches diésel disminuyen el ruido debido al traqueteo de la compresión (*Sun et al., 2020*). Sin embargo, reducir la temperatura de combustión provoca una caída del rendimiento y un aumento del consumo

de combustible. También produce una mayor emisión de materia particulada, siendo necesario en ocasiones añadir un filtro para partículas.

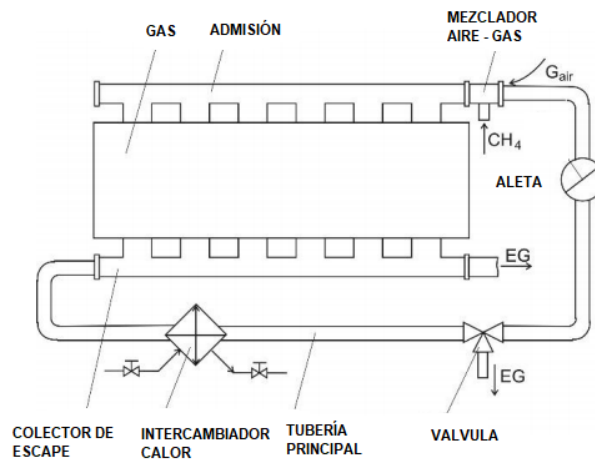


Figura 12: Esquema general del funcionamiento del sistema EGR (Lopatin, 2020)

- Catalizadores:

El uso del catalizador es obligado por ley hoy en día, pero merece la pena mencionarlo gracias al gran avance que ha supuesto en términos de reducción de emisiones. Comenzaron a usarse a mediados de la década de los setenta para adaptar las emisiones de los coches de tal modo que cumplieran con los requisitos exigidos por la EPA (*Environmental Protection Agency*), que pretendía reducir las emisiones en un 75% en coches de combustión. Un catalizador es un dispositivo acoplado al tubo de escape que actúa aumentando considerablemente la velocidad de una reacción química, de tal modo que consigue transformar una gran proporción de los gases generados (NO_x , CO, hidrocarburos, etc). Estas reacciones ocurren a una mayor temperatura, las cuales provocan que el NO_x se disocie, que el CO reaccione con el O para dar CO_2 , y que los hidrocarburos reaccionen también con el O para dar vapor de agua y más CO_2 . Además, estos catalizadores pueden usarse junto con trampas de NO_x , que actúan reteniendo estas moléculas de forma similar a como lo hace un filtro antipartículas. Sin embargo, tal y como se puede apreciar no erradican la contaminación de los vehículos. La utilidad del catalizador radica por tanto en convertir los compuestos más nocivos en otros de menor carácter contaminante, atacando así a los gases más perjudiciales para el ser humano y el medio ambiente. Según las características del catalizador, se consideran las siguientes tecnologías:

- Catalizadores de una, dos y tres vías:

Cada uno puede considerarse una evolución del anterior. Se parte de la configuración más sencilla, un solo cuerpo cerámico en la cual se produce la oxidación de los compuestos transformándose en vapor de agua y CO₂ (una vía). En el interior de este cuerpo puede colocarse una cámara de aire intermedia, en la cual se van a transformar los productos (dos vías). En la última configuración (tres vías) se impregna el catalizador comúnmente con rodio, un elemento químico que tiene especial afinidad con los NO_x y que hace al dispositivo más seguro, fiable y eficiente (*Rood et al., 2020*).

- SCR:

Esta es otra de las tecnologías que se han desarrollado como consecuencias de las cada vez más restrictivas normas sobre emisiones. Este sistema funciona de forma muy similar a un catalizador convencional, pero tiene una mayor influencia en la eliminación de NO_x. El sistema SCR se considera la tecnología más prometedora para cumplir con las normas EURO 6 de emisión de NO_x en vehículos pesados. Las emisiones de óxidos de nitrógeno dependen principalmente de la temperatura de combustión, el tiempo de combustión y la relación aire-combustible. El sistema SCR con amoníaco como agente reductor es capaz de reducir las emisiones de NO_x en más de un 95% (*Tan et al., 2019*). Sin embargo, usar amoníaco directamente como agente reductor no es apropiado debido a la dificultad de su almacenamiento y transporte, por lo que en su lugar se utiliza una fuente de urea, la cual puede descomponerse en amoníaco a temperaturas superiores a los 200°C. Para que la transformación tenga lugar, la solución de agua y urea se rocía en el tubo de escape frente al catalizador SCR, de tal forma que se logra el 100% de la conversión a amoníaco en la entrada del dispositivo. Esta disolución de alta capacidad depuradora recibe el nombre de *Adblue*, y es usado en aquellos vehículos diésel que portan la denominación de *BlueTec* o *BlueMotion* (*Joseph et al., 2021*). El *Adblue* debe recargarse periódicamente.

- Catalizador calentado eléctricamente (EHC):

Son utilizados para la gestión térmica de los convertidores catalíticos, pues actúan produciendo un súbito aumento de la temperatura por medio de una electrificación inteligente que va a fomentar la eliminación de los gases de escape (*Gao et al., 2019*). Este sistema garantiza una buena transformación de los contaminantes incluso cuando el

vehículo aún está frío o cuando circula a baja velocidad por las ciudades, momentos en los que mayor cantidad de gases nocivos se vierten (**Figura 13**).

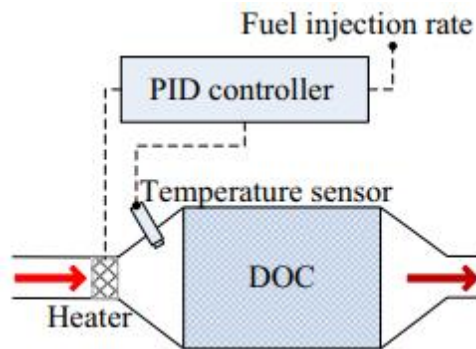


Figura 13: Esquema del funcionamiento del EHC (Gao et al., 2019)

- Trampas de HC (HCT):

Un método atractivo para tratar las emisiones de hidrocarburos durante el periodo de arranque en el que el vehículo se encuentra frío, es la utilización de trampas de hidrocarburos o HCT. El HCT almacena las emisiones de HC durante el período de arranque en frío y luego convierte los HC almacenados en CO₂ y H₂O, una vez que la trampa ha alcanzado la temperatura necesaria para oxidar los HC (**Figura 14.A**). Para motores diésel o motores de gasolina de mezcla pobre, el exceso de O₂ se puede utilizar para oxidar los HC almacenados. Las zeolitas se han convertido en los materiales adsorbentes de elección para los hidrocarburos debido a su estructura única y a sus propiedades ácidas (J. Lee et al., 2019). Estas propiedades permiten una mayor capacidad de almacenamiento a bajas temperaturas y la liberación de las especies almacenadas a altas temperaturas. Las zeolitas son capaces de adsorber HC de cadena larga, cadena corta y aromáticos, como decano, propeno y tolueno. Puede ir acompañado de un sistema SCR para mejorar los resultados de conversión (**Figura 14.B**)

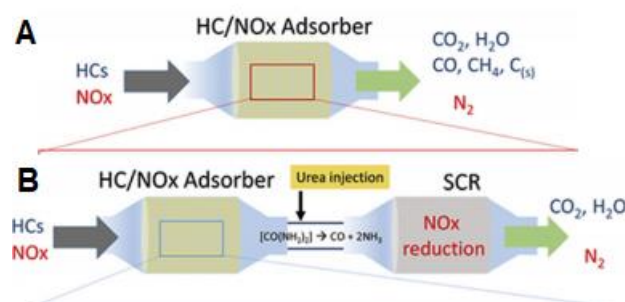


Figura 14: Configuración de las HCT (J. Lee et al., 2019)

- Fluidos iónicos:

Los fluidos iónicos son aquellos que están constituidos únicamente por iones, presentando un catión orgánico y un anión poliatómico que le otorgan un gran poder disolvente. Este tipo de fluidos son considerados como disolventes verdes, ya que su uso es beneficioso para el medio ambiente gracias a que se trata de sustancias que pueden ser reutilizadas y que pueden conseguir una disminución de las emisiones atmosféricas al no existir pérdidas del disolvente por evaporación. Igualmente, mediante una correcta selección del anión y del catión que formarán el fluido, pueden obtenerse líquidos iónicos que sean biodegradables. Los fluidos iónicos son capaces de eliminar una gran parte de elementos contaminantes de los combustibles, pues pueden ser utilizados para tratar la gasolina y el diésel para disminuir su contenido en azufre y nitrógeno (*S. Zhang et al., 2004*). Al mezclar el líquido iónico con combustible es posible determinar el rendimiento de eliminación de compuestos obtenido por medio de cromatografía de gases, espectrometría de masas y análisis de infrarrojos para los HC, S y N. Los resultados obtenidos (**Tabla 7**) permiten determinar los fluidos iónicos que contienen una mayor absorción de los compuestos de S y N, siendo el BMIMPF6 y el AICI-TMAC los líquidos iónicos que mejor cumplan con su cometido.

Tabla 7: Reducción en las cantidades de S y N en los distintos combustibles tratados con líquidos iónicos (*S. Zhang et al., 2004*)

TIPO DE COMBUSTIBLE	ANTES DEL TRATAMIENTO (ppm)		DESPUES DEL TRATAMIENTO (ppm)		S/N ELIMINADO (%)	
	S	N	S	N	S	N
DBT en n-C12	747		680		12	
Piridina en n-C12		779		425		45
DBT y piridina en n-C12	764	779	660	460	14	41
Piperidina en n-C12		661		601		9
DBT y piperidina en n-C12	764	723	677	658	11	9

- Filtros antipartículas (FAP):

Surgen como consecuencia del endurecimiento de las normas EURO, que obligaba a los vehículos diésel a mejorar su ingeniería para seguir el ritmo de los vehículos de gasolina en términos de emisiones. Estos filtros antipartículas son los responsables de evitar la enorme nube de humo negro que es expulsada por el tubo de escape de los vehículos, gracias a una notable retención del material particulado como el de los benzopirenos, los cuales son altamente nocivos y de carácter cancerígeno para el ser humano (*Yang et al., 2016*). Las partículas retenidas en el filtro son eliminadas mediante un aumento de la temperatura de

los gases que escapan a través de los poros del filtro, de tal manera que se emite CO₂ además de los gases habituales de combustión.

- Sistemas de recuperación de energía (ERS):

Los Sistemas de recuperación de energía (ERS por sus siglas en inglés) son métodos para recuperar la energía del vehículo que, de lo contrario, se habría desperdiciado. Esta energía puede ser almacenada y después utilizada, mejorando así la eficiencia del vehículo al reducir su consumo y emisiones, contribuyendo así a la posible adaptación del vehículo de combustión para seguir siendo competitivo en el mercado del futuro. La concepción ideal del ERS es poder almacenar toda la energía potencialmente recuperable y liberar esta energía almacenada de manera eficiente (*Gabriel-Buenaventura & Azzopardi, 2015*). Según el tipo de energía recuperada, el almacenamiento de esta y la tecnología se pueden clasificar diferentes técnicas (**Figura 15**). Las formas más habituales de obtención de energía son las siguientes:

- Sistema de recuperación cinética de energía (KERS):

En un motor de combustión, los gases son llevados a alta velocidad a través del escape. Parte de esta energía cinética puede ser recuperada por un generador de turbina, transformándola en energía eléctrica. Las oscilaciones verticales de la carrocería del vehículo también generan energía cinética que puede ser recuperada por medio de amortiguadores regenerativos, que podrá ser usada o almacenada en la batería. Sin embargo, la fuente más común de recuperación de energía es la inercia del vehículo debido a su velocidad. Al desacelerar o al frenar, la energía cinética que se genera puede recuperarse y reutilizarse nuevamente durante el proceso de aceleración del vehículo, reduciendo así la alta demanda del motor y, en consecuencia, el consumo. Esta técnica recibe el nombre de frenada regenerativa o i.Eloop (*Kume et al., 2013*).

- Sistema de recuperación térmica de energía (TERS):

En un motor de combustión se genera mucha energía en forma de calor. El TERS recupera parte de este calor para almacenar y reutilizar esta energía, bien mediante un generador termoeléctrico que produce electricidad a partir del calor residual liberado a través del

escape; o bien mediante el ciclo de Rankine, que convierte la energía térmica en energía mecánica por medio de una turbina (Gabriel-Buenaventura & Azzopardi, 2015).

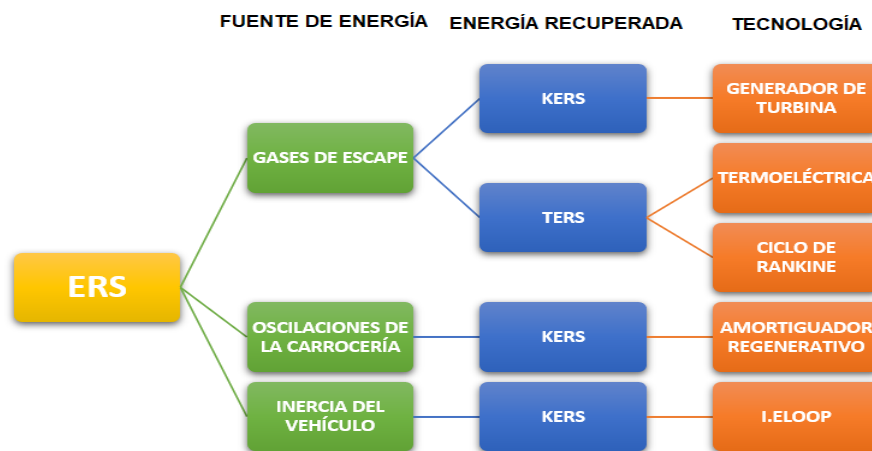


Figura 15: Clasificación de ERS (Elaboración propia)

4.2. Alternativas a los vehículos de combustión

Ante la gran influencia de los vehículos de combustión respecto al medioambiente, conviene la búsqueda y desarrollo de otras tecnologías consideradas más limpias. Los sistemas expuestos anteriormente favorecen la mejora ambiental del sector del automóvil, pero no eximen a los vehículos de combustión de las emisiones atmosféricas, las cuales continúan siendo una problemática. Además, las normas EURO son cada vez más restrictivas, dificultando el desarrollo de los vehículos de combustión al tener que cumplir los estándares estipulados en dichas normas. Ante este escenario, los vehículos eléctricos y/o los de pila de combustible pueden convertirse en los sustitutos de los vehículos de combustión, produciéndose así una transición energética hacia energías más verdes.

4.2.1. Vehículos eléctricos

El vehículo eléctrico es en la actualidad la alternativa más fuerte al vehículo de combustión. Pese a ello, el desarrollo y uso del vehículo eléctrico no está del todo exento de tener un impacto medioambiental en todo su ciclo de vida. Tanto durante su construcción como durante su utilización y reciclado, los vehículos eléctricos causan importantes daños medioambientales, ya que se usan diversos recursos de carácter contaminante (como puede ser el litio de las baterías o las emisiones que generan de forma indirecta en los puntos de producción de energía).

4.2.1.1. Tipos de EV

Estos vehículos son movidos por medio de energía eléctrica, existiendo diferentes tipos:

- Vehículos eléctricos de batería: Estos son los vehículos eléctricos en esencia, los cuales cuentan únicamente con el motor eléctrico y la batería, sin presentar motor de combustión. Deben de enchufarse a una fuente de energía para recargarse y su autonomía depende de la duración de descarga de las baterías (*Mahmoudzadeh Andwari et al., 2017*).
- Vehículos no enchufables: Son los más comunes en la actualidad, los cuales cuentan con baterías que se recargan automáticamente. Cuentan con motores de combustión.
- Vehículos enchufables: Funciona gracias a sus baterías. Sin embargo, cuando estas se agotan, el motor de combustión comienza a trabajar bien para recargar la batería o bien para suministrar una mayor autonomía al vehículo.
- Vehículos eléctricos de autonomía extendida: También son vehículos híbridos que combinan el uso de sus baterías con el de un motor que se enciende cuando las baterías se agotan.

Como se puede observar, pese a que existen diversos tipos, todos ellos se basan principalmente en su batería como dispositivo de obtención de energía. Esta es quizá la parte más representativa de los coches eléctricos y una de sus principales diferencias con respecto a los vehículos de combustión.

4.2.1.2. Baterías

Las baterías no solo son acumuladores de energía en las que se almacena la electricidad que será transmitida al motor; sino que también son la identidad de los coches eléctricos, las que le proporcionan la autonomía, pues gracias a ellas consiguen independizarse del uso de combustibles fósiles, en la medida de lo posible según el tipo de EV, como fuente de energía. Hoy en día existen gran variedad de baterías, las cuales tienen la capacidad de mantenerse en activo gracias al paso de la corriente eléctrica. Son estas las clases de baterías que se usan en los coches eléctricos, salvando así el enorme impacto ambiental que conllevaría el uso de baterías que fuesen incapaces de recargarse una vez que se agotan. Sin embargo, una vez que estas baterías se desgastan deben de ser sustituidas por unas nuevas,

por lo que pueden terminar produciendo un alto daño ambiental. Las baterías suponen un sector de gran interés, el cual está en continua investigación y desarrollo. En la actualidad existe una gran variedad de baterías, las cuales están formadas por diferentes compuestos que le otorgan diferentes características (**Tabla 8**):

- Baterías de plomo-ácido:

Este es el tipo de batería más común, pues está presente en los vehículos de combustible convencionales actuando como batería de arranque. Sin embargo, también fue usada en los primeros modelos de coches eléctricos. Tienen un coste muy bajo y una energía específica baja, pero actualmente se están dejando de usar en los coches eléctricos debido a que tienen un alto tiempo de recarga y a que ofrecen una autonomía muy pobre (en torno a 100 km), por lo que tampoco se contempla su uso para los EV del futuro. Se trata, por tanto, de una tecnología muy madura y bien conocida, cuyo potencial de mejora es baja. Un avance en estas baterías fue la tecnología de válvula regulada, que reduce el tiempo de carga y la pérdida de electrolitos. Pero aún con todo, no son utilizadas debido a la existencia de otros tipos de baterías más competitivas (Mahmoudzadeh Andwari et al., 2017). Su principal problema desde el punto de vista medioambiental consiste en la generación de desechos de plomo, un elemento altamente tóxico que causa daños irreversibles en los organismos, en especial por su carácter acumulativo (Ordóñez & Guerra, 2011).

- Batería de níquel:

Se pueden diferenciar dos tipos de baterías compuestas por níquel: Las de níquel-cadmio (NiCd) y las níquel-hidruro metálico (NiMH). Las baterías de NiCd están compuestas por un cátodo de hidróxido de níquel y un ánodo de cadmio, siendo el electrolito utilizado un hidróxido de sodio. Esta combinación de materiales permite una rápida recarga tras agotarse su energía, sin embargo, la capacidad de este tipo de baterías es muy baja. Estas se consideran de mejor calidad que las de plomo ácido, ya que tienen una larga vida cíclica y una gran fiabilidad, pero su elevado coste y su vulnerabilidad al calor han provocado que dejen de producirse en muchos países. Las de NiMH fueron introducidas a finales de los años 90 como una nueva tecnología de calidad superior a las anteriores, ya que contaban con una mayor capacidad, eran más ligeras y carecían de compuestos de cadmio, por lo que fueron consideradas como un “combustible” mucho más limpio y barato. Muchos de los primeros

vehículos eléctricos e híbridos usaban este tipo de baterías, como fue el caso del Honda Civic Hybrid o del EV1 de General Motors, primer vehículo eléctrico de la era moderna. Las baterías de NiMH fueron las más usadas durante años hasta que aparecieron las compuestas por litio, el metal más ligero que existe. Aún con todo, esta tecnología se ha utilizado recientemente en vehículos híbridos como el Toyota Prius, pues resultan más económicas que las de litio. Al igual que con las baterías de plomo-ácido, se trata de una tecnología madura cuyo máximo potencial ya ha sido alcanzado. Presenta una densidad energética de entre 60 y 80 Wh/kg, lo cual se considera más que suficiente para los vehículos eléctricos de batería (*Mahmoudzadeh Andwari et al., 2017*).

- Baterías de litio:

Estas baterías no requieren de mantenimiento alguno, tienen un menor ratio de autodescarga y una mayor densidad de energía que el resto de los tipos de baterías. Su precio, por el contrario, sí que es el más alto del mercado, al igual que el riesgo asociado a su uso al ser un elemento químicamente inestable, capaz de explotar si alcanza temperaturas elevadas. Se pueden crear distintos tipos de combinaciones de litio, obteniendo así baterías de distintas características. Las baterías de ion-litio se considera la más prometedora para el futuro cercano, siendo la tecnología sobre la que más estudios existen. Tiene una alta densidad de energía porque el litio posee el mayor potencial electroquímico y una baja masa equivalente. En consecuencia, posee una alta eficiencia y una larga vida útil, mostrando además un gran potencial de desarrollo. Las baterías de polímero de litio (LiPo) tienen un menor coste de producción y una amplia variedad en empaquetado, ya que pueden conseguirse baterías de tan solo 1mm de grosor gracias al polímero y solventar los problemas de temperatura mediante la adición de un gel electrolito. Estas baterías pueden parecer las más adecuadas para impulsar vehículos eléctricos, pero su elevado coste supone un gran impedimento para muchas marcas (*Mahmoudzadeh Andwari et al., 2017*). Las de litio ferrofosfato (LiFePO₄ o LFP) son una buena alternativa para solventar el elevado precio de las poliméricas y la inestabilidad térmica de las de ion litio, y además ofrecen un elevado ciclo de vida y no contienen elementos tóxicos para el medio ambiente. Estas por tanto serían la mejor elección pese a tener una densidad energética levemente menor. De hecho, la producción de este tipo de baterías se encuentra al alza en la actualidad, presentando un aumento del 109% e integrándose en 19.000 vehículos eléctricos en junio de 2020. Marcas

como Tesla están integrando estas baterías en sus vehículos, gracias a la cual han conseguido crear el Tesla Model 3 más barato jamás fabricado (Yin et al., 2019).

- Batería de cloruro de níquel y sodio:

Esta tecnología ofrece múltiples ventajas. Se consideran seguras y de bajo coste, con un ciclo de vida largo que puede superar los 1000 ciclos y puede ser descargada al completo sin degradar su esperanza de vida, al contrario de lo que ocurre con el resto de las baterías. Sin embargo, a pesar de contener una energía específica satisfactoria comparable a la de los iones de litio (unos 120 Wh/kg) su potencia resulta ser considerablemente menor. Por ello no se considera una fuente de alimentación adecuada para los vehículos eléctricos no enchufables (Mahmoudzadeh Andwari et al., 2017).

Tabla 8: Tabla resumen de los distintos tipos de baterías usadas en automóviles (Elaborada a partir de RACE).

TIPO DE BATERÍA	CICLOS DE VIDA	DENSIDAD ENERGÉTICA (Wh/kg)	MANTENIMIENTO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Pb-ácido	500-800	20-40	Si, periódico	Bajo coste, buena respuesta ante el frío	Pesadas, tóxicas, lenta recarga
NiCd	1500-2000	40-60	Cuidado específico	Fiabes, técnicas de reciclado para estas baterías	Alto coste, contaminantes, sensibles al calor
NiMH	300-500	60-80	Si	Eliminan cadmio (compuesto tóxico)	Baja fiabilidad y resistencia
Ion litio	400-1200	100-250	No	Alta densidad energética y eficiencia	Alto coste, frágiles, inestables
LiFePO4	2000	90-100	No	Seguridad, estabilidad, potencia	Menor densidad energética
LiPo	1000	300	No	Ligeras y eficientes	Precio elevado
ClNi/Na	1000	120	No	Sin degradación de su vida útil, baja coste	Baja potencia

4.2.1.3. Impacto

Los principales problemas medioambientales generados por los vehículos eléctricos vienen determinados por las emisiones generadas de forma indirecta (Kawamoto et al., 2019). Las

políticas de los vehículos eléctricos generalmente se justifican haciendo alusión a la enorme cantidad de disminución de emisiones que se producen al sustituir los vehículos de combustión por los eléctricos. Es cierto que las emisiones desde el tubo de escape se ven reducidas, pero las emisiones causadas en la producción de energía se ven aumentadas siempre y cuando no se descarbonice el sector por medio de energías renovables. A continuación, se muestra un estudio realizado por el instituto IFO en el que se muestran los niveles de contaminación asociados a los vehículos y a su obtención de energía eléctrica en Estados Unidos (EE. UU.). Para ello se consideran cuatro escenarios:

- Un escenario de referencia en el cual el precio del carbón va aumentando paulatinamente a la par que aumenta el número de vehículos eléctricos, produciéndose una lenta transición energética.
- Un escenario en el que el precio del carbón aumenta considerablemente.
- Un escenario de alta demanda de los vehículos eléctricos con un precio fijo del carbón, en el que el 46% de los vehículos son eléctricos en 2050.
- Un escenario que combina los dos escenarios anteriores. Es decir, donde aumenta el precio del carbón considerablemente y hay una alta demanda de vehículos eléctricos cuya energía ha sido producida por medio de este carbón.

De esta forma es posible comparar el impacto de esta transición energética (**Figura 16**).

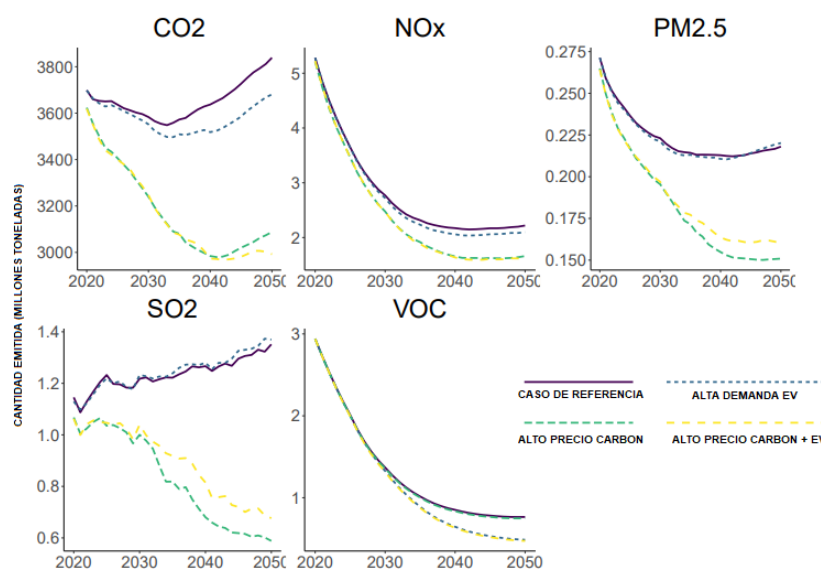


Figura 16: Emisiones asociadas a los vehículos y a la producción de energía eléctrica en EEUU (Instituto IFO)

La intuición común es que los vehículos eléctricos reducirán las emisiones aún más en un sistema descarbonizado debido a los altos precios del carbón. Sin embargo, tal y como puede observarse, llega un punto a partir del cual las emisiones se estabilizan o incluso se produce una mayor intensidad de estas. Esto se produce debido a que la electricidad que impulsa a los vehículos eléctricos es obtenida por medio del carbón de tal forma que, en cierta medida y paradójicamente, los vehículos eléctricos mantienen a las plantas de carbono activas. Se requiere por tanto un alto desarrollo de las energías renovables para la producción de energía a la par que aumenta la demanda de los vehículos eléctricos para lograr una adecuada transición energética.

4.2.2. Vehículos de hidrógeno

Los vehículos de hidrógeno o de pila de combustible son los más atractivos en la actualidad, pues han sido considerados como los coches del futuro, por delante incluso de los vehículos eléctricos. Estos vehículos son propulsados mediante una reacción electroquímica gracias al hidrógeno, el elemento más abundante de todo el planeta. En una pila de combustible el hidrógeno y el oxígeno del aire se fusionan para producir agua.

4.2.2.1. Pila de combustible

Estas pilas están formadas por celdas o células individuales, las cuales constan de un ánodo y un cátodo, entre los cuales hay una cierta cantidad de platino. En el ánodo tendrá lugar la reacción del hidrógeno, el cual se disociará en dos protones y dos electrones. Los protones circularán hacia el cátodo, mientras que los electrones se escapan por un circuito eléctrico que conecta ambos electrodos, generando la energía suficiente como para propulsar un vehículo (**Figura 17**). La energía sobrante entonces si puede ser almacenada en baterías, al igual que en un coche eléctrico (*Tollefson, 2010*). Esta energía sobrante junto con la obtenida gracias a tecnologías como la de la frenada regenerativa podría permitir el movimiento del coche durante determinados periodos incluso sin necesidad de estar produciendo hidrógeno. Por tanto, Una pila de combustible es considerada como una central energética portátil, y no un lugar en el que almacenar la energía, función que realiza una batería convencional. Es decir, el hidrógeno es “procesado” en el interior del vehículo para obtener la electricidad (energía) requerida. En la actualidad existen una gran variedad de pilas de combustible, siendo este el concepto base.

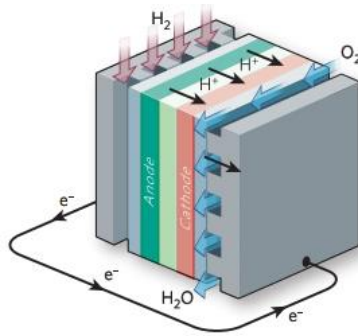


Figura 17: Pila de combustible (Tollefson, 2010)

4.2.2.2. Almacenamiento de hidrógeno

El almacenamiento de hidrógeno que alimentará la pila de combustible es uno de los temas de investigación más importantes en el desarrollo de los FCV. En la actualidad se están desarrollando sistemas de almacenamiento de hidrógeno para introducir nuevos métodos para satisfacer las necesidades de los clientes. Debido a la baja densidad energética del hidrógeno, es difícil almacenar suficiente a bordo de un vehículo para obtener un rango de conducción adecuado sin que el dispositivo de almacenamiento sea demasiado grande o pesado (**Figura 18**).

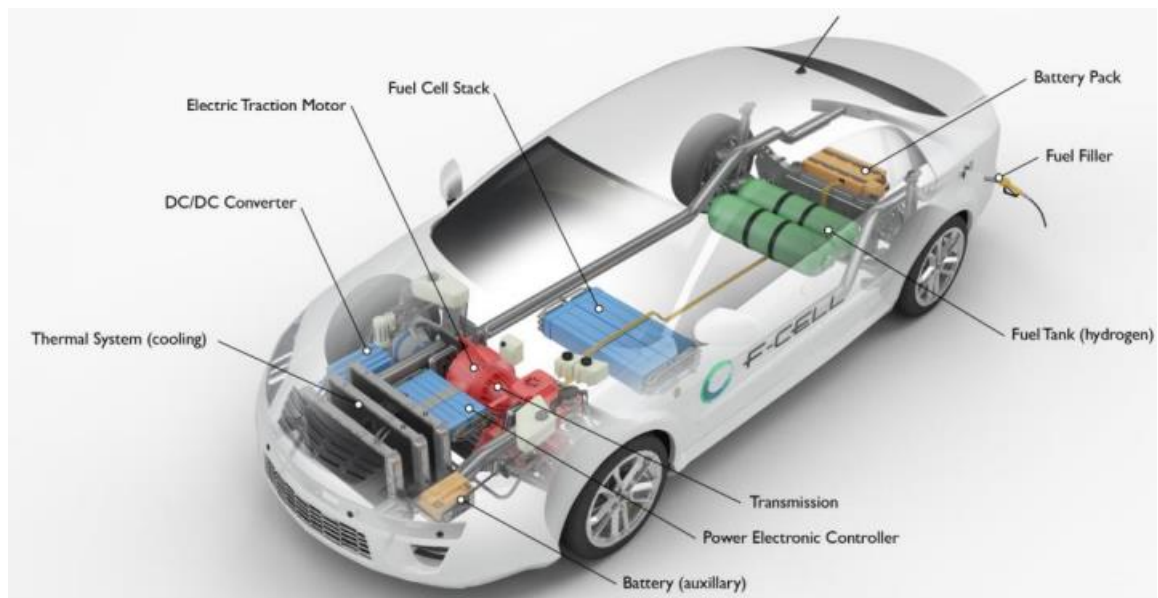


Figura 18: Esquema típico de la pila de combustible y tanque de hidrógeno en un FCV (Manoharan et al., 2019)

Se consideran diversas técnicas de almacenamiento de hidrógeno en los vehículos (Manoharan et al., 2019):

- Tanque presurizado:

En estos tanques envueltos de fibra de carbono se encuentra el hidrógeno comprimido a unos 34 MPa, ocupando un espacio de 186 litros y con una masa de 32,5 kg; lo cual ofrecería una autonomía de unos 500 km. La mayor problemática es el volumen que ocupa. A principios de siglo algunos fabricantes como Toyota y Honda comenzaron a utilizar estos tanques de alta presión, pero debido a la baja densidad del gas no era posible almacenar la suficiente cantidad. Por otro lado, el almacenamiento de hidrógeno líquido a bajas temperaturas no es apropiado para el uso normal de un vehículo, aunque algunos fabricantes continúan investigando esta viabilidad a bajo nivel.

- Absorción en compuestos metálicos:

Es posible hidratar un metal para conseguir almacenar hidrógeno por debajo de los 3 Mpa y por encima de la temperatura ambiente. Sin embargo, los metales inducen demasiado peso adicional para la mayoría de los vehículos y en su mayoría son caros. Pero el nitruro de litio obtiene unos resultados de absorción y liberación de hidrógeno bastante optimistas con respecto al reto de metales. Este material almacena hidrógeno rápidamente en un rango de temperaturas que va de los 170–210°C, pudiendo almacenar el hidrógeno a una mayor temperatura a coste de reducir la eficacia del proceso. En cuanto al aprovechamiento de este hidrógeno, dos tercios son liberados en una situación de alto vacío (10⁻⁹ MPa) y con una temperatura de 200°C, necesitando elevar la temperatura hasta los 320°C para liberar la fracción restante. El hidrógeno es absorbido en forma de amida de litio (LiNH₂) e hidruro de litio (LiH). Diversos autores han señalado que los sistemas de metales absorbentes deberían de estudiarse y desarrollarse para encontrar así las temperaturas más prácticas para el almacenamiento de hidrógeno.

- Almacenamiento de hidrógeno líquido criogénico:

En este modelo el hidrógeno es almacenado en forma líquida al alcanzar los -259,2°C. Pero mantenerlo a estas temperaturas supone todo un desafío, además de que se trata de un proceso que requiere cierta energía. El hidrógeno líquido se vuelve explosivo cuando se mezcla con ciertos gases, por lo que antes de volver a llenar el tanque con hidrógeno, se debe usar gas nitrógeno para drenar los gases residuales presentes dentro del tanque.

4.2.2.3. Producción de H₂ e infraestructuras

Este hidrógeno debe de ser previamente producido, transportado y almacenado en las conocidas como hidrogeneras, los establecimientos de repostaje de hidrógeno. En cuanto al impacto que puede causar el vehículo de hidrógeno, este viene determinado por el proceso de producción de hidrógeno, algo similar a lo que ocurre con los vehículos eléctricos. Existen diversas formas de producir hidrógeno (**Figura 19**). Lógicamente, la forma más limpia es por medio de energías renovables, de tal modo que se convertiría en una tecnología 100% limpia. Si el vehículo es híbrido, entonces las emisiones vendrán determinadas por las rutas y las configuraciones del tren de potencia del vehículo, pero en general las emisiones de un híbrido ya deberían de ser entre un 20-70% menores con respecto a las de un vehículo convencional (*Kurtz et al., 2019*).

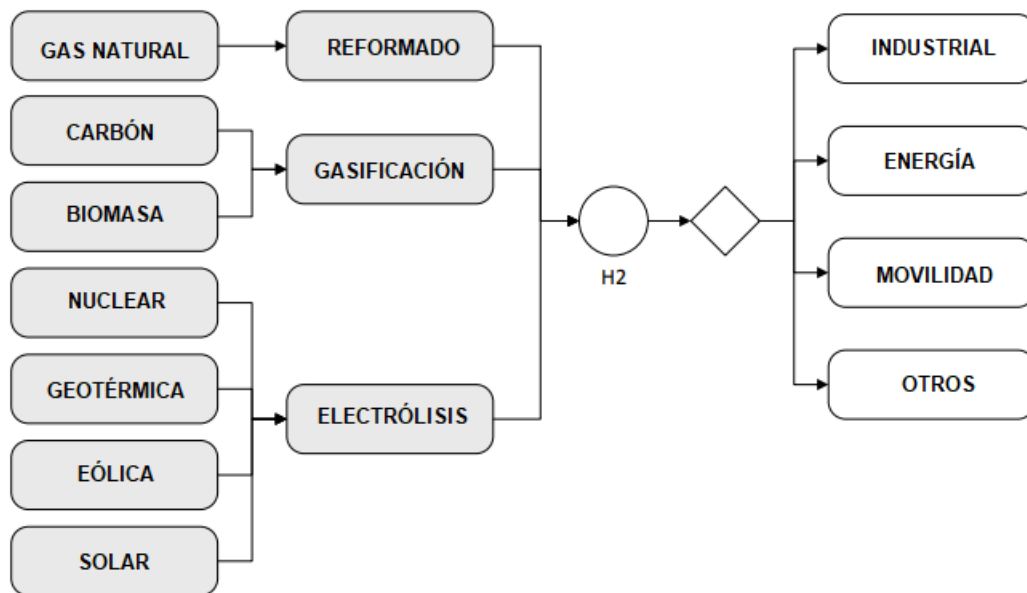


Figura 19: Vías generales de obtención de hidrógeno (Kurtz et al., 2019)

Para hacer llegar este hidrógeno hasta las hidrogeneras, generalmente se utilizan depósitos presurizados que son llevados por camiones, trenes u otros medios de transporte hasta las estaciones. Aunque es la opción más considerada en la actualidad, esto requiere un alto nivel tecnológico y una alta inversión a nivel industrial. Otra opción es por medio de gaseoductos, bastante desarrollados en la actualidad. En cuanto al almacenamiento en las estaciones de hidrógeno, este elemento puede ser almacenado a modo de gas comprimido, como líquido criogénico o como sólido absorbido, siguiendo por tanto el mismo sistema de

almacenamiento que en los vehículos. La mayoría de las estaciones actualmente en funcionamiento utilizan el primer método. Esta configuración es el resultado de la uniformidad en el diseño y en el suministro de la estación, y minimiza los costos. Sin embargo, si el espacio es un factor crítico, entonces puede ser almacenado a modo de hidrógeno líquido. En la actualidad la gran parte de estaciones de repostaje y de vehículos almacenan el hidrógeno a alta presión (*Vicens Garcia, 2011*).

4.2.2.4. *Ventajas e inconvenientes*

En general, el hidrógeno tiene unas características muy buenas y un potencial significativo para contribuir a la transición energética y a la reducción de emisiones, especialmente en el sector del automóvil. Sin embargo, existen algunas barreras clave que deben superarse antes de que se puedan materializar todos los beneficios que aporta el hidrógeno y su aplicación en los vehículos. Los principales desafíos que presenta actualmente el hidrógeno y los FCV se deben a su autonomía, la economía, sus infraestructuras y al marco político.

La asequibilidad es una de las principales barreras para un uso más amplio y una integración más rápida de los FCV. La movilidad proporcionada por los FCV y el hidrógeno sigue siendo muy cara y no es competitiva con los vehículos convencionales, así como con otras alternativas como los vehículos eléctricos recargables. Para la comercialización del FCV, lo más importante es reducir los costes de inversión. Suponiendo la ambición de la difusión de sistemas de propulsión alternativos para automóviles que se han anunciado por medio de diversas políticas, se puede esperar que se produzca una mayor reducción de costos de los FCV a través del aprendizaje tecnológico. Dado que no se espera que este aprendizaje tecnológico se produzca en los vehículos convencionales, la diferencia de precios entre los FCV y los vehículos de combustión disminuirá a lo largo del tiempo (**Figura 20**).

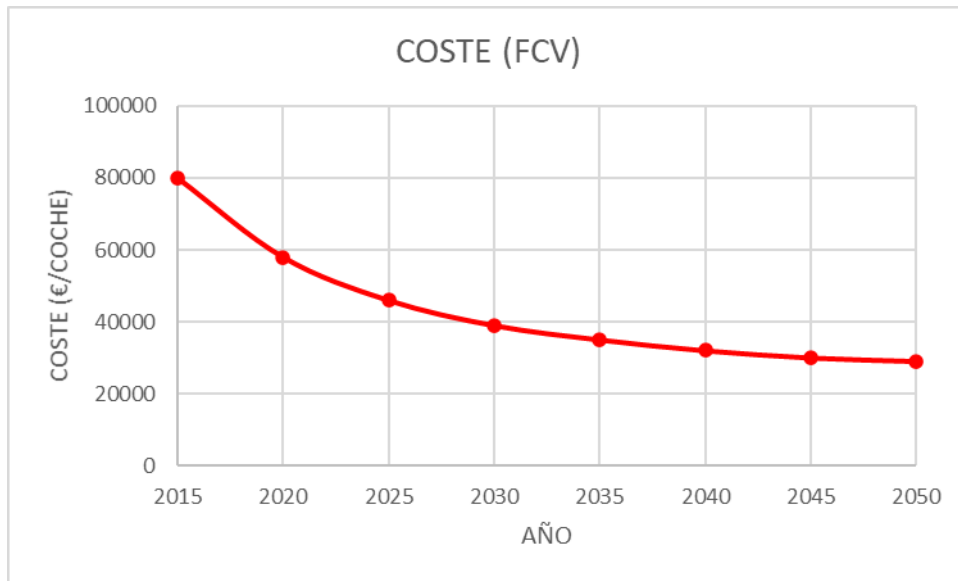


Figura 20: Evolución de los costes de los FCVs (*Ajanovic & Haas, 2021*)

Pese a que estos costes son muy elevados y se encuentran lejos de ser competitivos con los del vehículo de combustión, algunas marcas ya han colocado en el mercado algunos modelos de FCV, como es el caso del Toyota Mirai, el Honda Clarity o el Hyundai Nexo. A excepción de los costes, los FCV son comparables a los vehículos convencionales de combustibles fósiles en cuanto a autonomía de conducción, que se sitúa entre 400 y 550 km por tanque, así como en cuanto al tiempo de repostaje (2-5 minutos). Además, los FCV son silenciosos y tienen cero emisiones en el punto de uso. Incluso si se utiliza hidrógeno producido por reformado con vapor de gas natural, proceso que genera cierta contaminación, los FCVs pueden competir con las emisiones de los vehículos de combustión. Además, el hidrógeno es un elemento inocuo y seguro, y el consumo en los FCVs resulta ser significativamente menor que en los vehículos de combustión (*Ajanovic & Haas, 2021*). Por otro lado, independientemente de la autonomía, todos los vehículos necesitan combustible en algún determinado momento, y aquí es donde radica el principal inconveniente de los vehículos de hidrógeno. Estos nunca van a poder venderse a gran escala hasta que exista una red viable de estaciones de servicio para alimentarlos. A su vez, nunca se van a vender a lo grande si no se invierte lo suficiente en las infraestructuras necesarias para su sostenibilidad. De este modo se forma un círculo cerrado que mantiene el desarrollo del vehículo de pila de combustible en suspensión (*Tollefson, 2010*). Y aquí es donde se

encuentra el segundo gran inconveniente de los vehículos de combustión: la necesidad de infraestructuras nuevas, pero caras.

Según la marca coreana Hyundai, en la actualidad existen solo unas 500 estaciones de repostaje de hidrógeno en todo el mundo, la mayoría repartidas en países como Alemania o Japón, por lo que resulta muy complicado e incluso imposible la movilidad de estos vehículos por determinados países o regiones. En esta etapa inicial de desarrollo, es más fácil habilitar la infraestructura para los determinados tipos de FCV, como autobuses y diferentes tipos de vehículos de entrega y servicio, que tienen determinadas rutas de conducción y que pueden utilizar una ubicación central para repostar. Esta infraestructura local y los conocimientos relacionados adquiridos deben utilizarse en el desarrollo de una red de infraestructura más amplia entre países. Para lograrlo es importante desarrollar estándares y normativas comunes en materia de seguridad, mantenimiento, pago, etc. Pero esta etapa inicial supone un elevado riesgo económico, debido a la poca utilización que tendrían estas estaciones en sus primeros años (*Ajanovic & Haas, 2021*). Por suerte, países europeos como Alemania y Noruega pretenden romper este círculo mediante la inversión en una red adecuada de suministro de hidrógeno, dando un importante paso hacia la transición energética (*Tollefson, 2010*).

Finalmente, el futuro papel del hidrógeno y de las pilas de combustible en el sector del transporte depende en gran medida del marco político y de los objetivos futuros. El problema radica en que las políticas implementadas, las inversiones realizadas y los objetivos futuros son significativamente diferentes de un país a otro. El apoyo a las políticas para vehículos de pila de combustible e hidrógeno, así como para la infraestructura correspondiente, está impulsada principalmente por diferentes prioridades nacionales, como la calidad del aire, el cambio climático o la seguridad energética. Por otro lado, también existen otras políticas que apoyan indirectamente el uso de los FCVs, como las normas de emisiones o la prohibición de ciertos vehículos de combustión. El principal problema para un despliegue más rápido y amplio del hidrógeno y de los FCVs es, por tanto, la falta de normativas enfocadas directamente en estos vehículos y la necesidad de una acción coordinada entre las diferentes partes interesadas. Además, se necesitan los estándares tecnológicos que impulsarían las economías de escala y reducirían los riesgos de

la inversión (Ajanovic & Haas, 2021). Aunque la Comisión Europea (CE) reconoce que la aceptación del mercado de vehículos alternativos y el despliegue de infraestructura están fundamentalmente conectados, su propuesta de objetivos de CO₂ posteriores a 2021 para turismos y furgonetas no vincula la disponibilidad de estas infraestructuras con el objetivo, resultando un tanto ambiguo.

4.2.2.5. Comparación vehículo eléctrico y de hidrógeno

Se debe de partir desde la base de que los vehículos eléctricos se encuentran mucho más desarrollados en la actualidad con respecto a los vehículos de pila de combustible. A pesar de ello, la batería del EV sigue siendo un campo que debe de mejorar en términos de almacenamiento de energía y reciclaje. La similitud más evidente entre ambos tipos de vehículos es el ínfimo ruido que generan, reduciendo los niveles de contaminación acústica a niveles prácticamente nulos. Sin embargo, esto puede resultar un peligro para la sociedad, pues esta está acostumbrada a asociar la ausencia del ruido con la ausencia del vehículo. Para salvar este inconveniente, muchos de los EV y FCV plantean la incorporación de un mecanismo que produzca un determinado nivel de ruido a bajas revoluciones.

Una de las cuestiones más planteadas con respecto a estas tecnologías alternativas es si se están solucionando los problemas de contaminación asociados a vehículos de combustión o si estos simplemente se están pasando al sector energético (Figura 21).

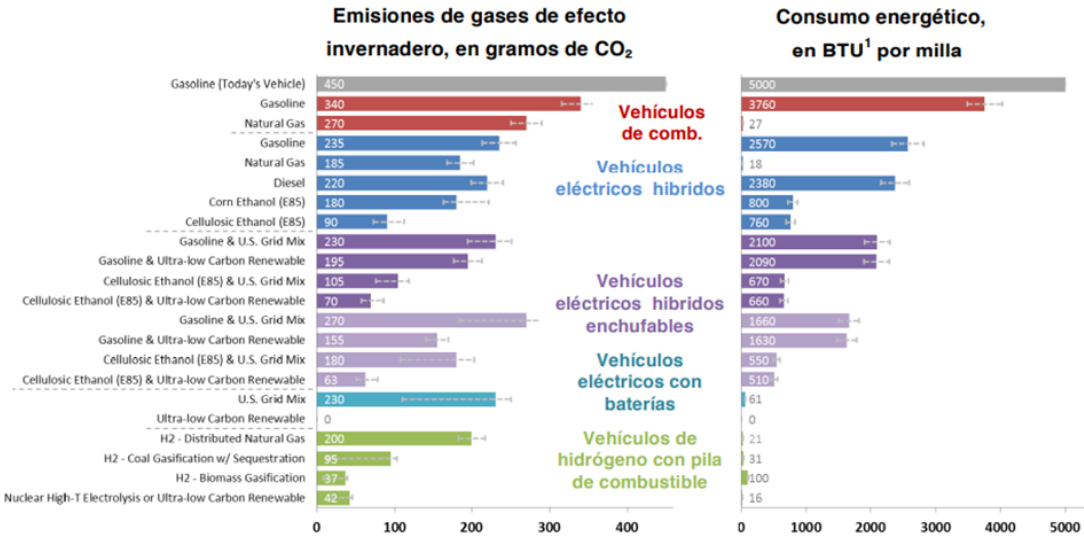


Figura 21: Emisiones y consumo energético de gases de efecto invernadero en diferentes tipos de vehículos (Vicens Garcia, 2011)

Los vehículos eléctricos de batería y los de pila de combustible son los que realizan un menor consumo energético. Sin embargo, la fabricación de las baterías de iones de litio y su deposición final son procesos que tienen una alta huella de carbono (*Rosenfeld et al., 2019*). Es por ello por lo que sería posible decantarse por el hidrógeno como la tecnología más limpia. Además, para tener un vehículo con una autonomía de 500 km, sería necesario una batería de iones de litio de más de 800 kg en el caso de los EV, mientras que haría falta un sistema de almacenamiento de energía de 125 kg en FCV (**Figura 22**).

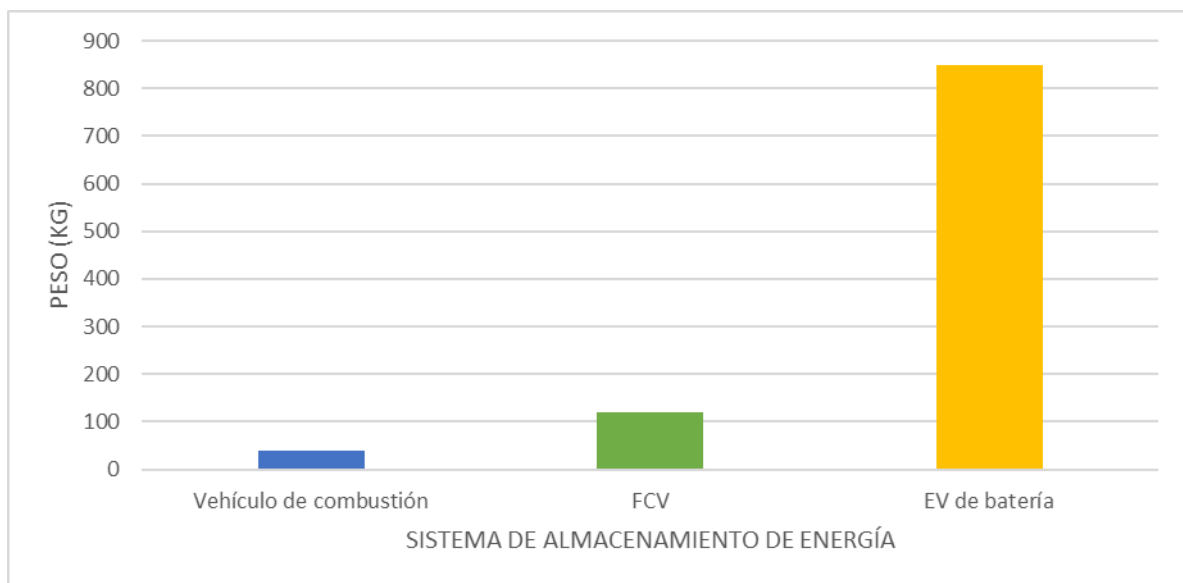


Figura 22: Peso de los sistemas de almacenamiento de energía en diferentes vehículos para realizar 500 km (*Ajanovic & Haas, 2021*)

Por otro lado, si se observan las emisiones asociadas a todo un ciclo de vida con una fase de uso de 200.000 km (**Figura 23**), entonces resulta ser el vehículo enchufable el más respetuoso, siempre y cuando la energía provenga de fuentes limpias. Esto se debe a que la producción del vehículo de hidrógeno tiene un mayor impacto en el medio ambiente que el vehículo enchufable.

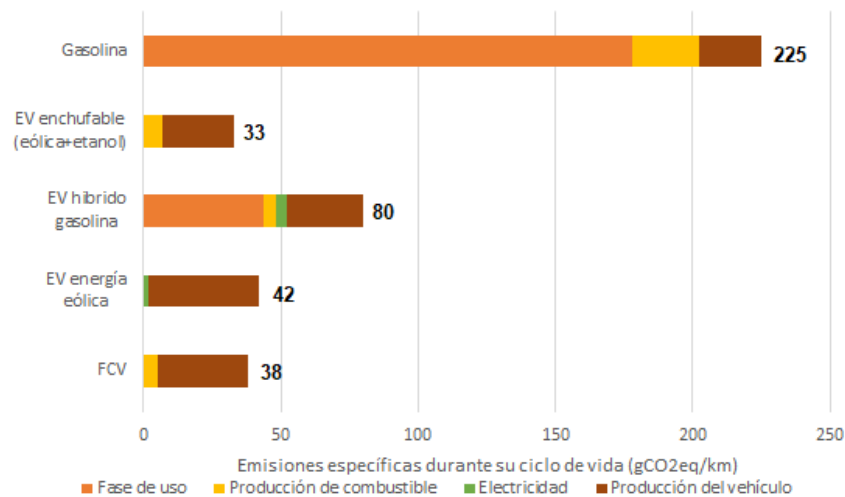


Figura 23: Potencial de contaminación de diferentes tecnologías basada en un tiempo de vida de 200.000 km (Rosenfeld et al., 2019)

Así pues, existe cierta controversia sobre cuál es la mejor tecnología de cara al medio ambiente. Sin embargo, teniendo en cuenta el nivel de desarrollo y el potencial de cada uno de ellos, podría considerarse a los FCV como la tecnología del futuro, pudiendo llegar a unos valores de emisiones prácticamente nulos durante todo su ciclo de vida gracias a la implantación de las energías renovables para la producción de hidrógeno. En todo caso, los vehículos alternativos ayudan a reducir las emisiones de movilidad en torno al 75%. El potencial demostrado para la reducción de CO₂ a través de las opciones de movilidad renovable evaluadas respalda firmemente la producción más limpia de vehículos y combustibles. Finalmente, la **Tabla 9** muestra a modo de resumen las principales diferencias entre la pila de combustible y la batería. En ella puede observarse que los principales inconvenientes del hidrógeno como combustible radican únicamente en el bajo nivel de desarrollo que presentan, siendo aun así una tecnología extremadamente competitiva cuyo potencial resulta tremendamente atractivo para el sector del automóvil y la sostenibilidad ambiental.

Tabla 9: Comparativa entre EVs y FCVs (Vicens Garcia, 2011)

	BATERÍA	PILA DE H₂
PRODUCTIVIDAD	Alto tiempo de recarga	Repostado inmediato
	Ciclo completo carga/descarga	Repostaje en cualquier momento
	Caída de voltaje	Voltaje constante
	Control de autonomía impreciso	Control preciso de autonomía
COSTES	Vida limitada	Larga vida
	Precio de la electricidad	Precio del hidrógeno
	Precio de la batería	Precio de la pila de hidrógeno
MEDIO AMBIENTE	Gestión de plomo, ácido y demás elementos	Emisiones cero en el punto de uso
SEGURIDAD	Carga pesada, riesgo personal y material	Fácil manipulación
FIABILIDAD	Tecnología probada durante años	Relativamente novedosa
FLEXIBILIDAD	Limitada	Gran flexibilidad de operación

4.2.2.6. Vehículos pesados de hidrógeno

Hasta ahora, el presente trabajo se ha centrado únicamente en los vehículos ligeros. Sin embargo, los vehículos pesados utilizados para el comercio a gran escala también han ido evolucionando a la par que estos, implementando la tecnología de hidrógeno. El tren de potencia de un camión eléctrico consta de un paquete de baterías y de los motores eléctricos. Este tren motriz es mucho más simple que el de un camión diésel convencional. Los que están basados en la pila de combustible funcionan de forma muy semejante, pues ambos emplean motores eléctricos. Sin embargo, al igual que ocurre con los vehículos ligeros, el motor eléctrico es movido por medio de una pila de combustible.

Los vehículos pesados consiguen salvar uno de los factores más destacados de los vehículos ligeros: el almacenamiento del hidrógeno. Estos vehículos presentan un mayor tamaño, por lo que pueden llevar tanques de mayor tamaño y, en consecuencia, una mayor cantidad de hidrógeno que puede ser almacenado tanto en su forma líquida como a alta presión.

Mientras que el Toyota Mirai presenta un depósito de 5,6 kg, estos vehículos pesados pueden transportar dos tanques de unos 40-60 kg de hidrógeno cada uno, lo cual les permite recorrer entorno a unos 800-1600 km a la vez que reducen considerablemente el peso con respecto a los vehículos pesados convencionales, con una potencia continua de 230 kw, presentando picos de hasta 330Kw, lo equivalente a unos 880 cv (**Tabla 10**) (Cunanan et al., 2021). En términos de emisiones, el ciclo de vida de un camión de hidrógeno es mucho más limpio que el de un camión diésel, pues se reducen los COV en un 37-65%; el CO en un 49-77%; el NO_x en un 62-83%; y la MP en un 27-44% (Lee et al., 2018). Esta reducción de emisiones se debe principalmente a la eliminación de los gases de escape. Esta notable reducción evita la formación del conocido como smog fotoquímico, el cual es una seria preocupación en determinadas zonas. En otras palabras, el uso de camiones de pila de combustible podría contribuir a reducir el riesgo de formación del smog en áreas susceptibles. La principal desventaja de estos vehículos, al igual que ocurre con los ligeros, es su elevado precio en comparación con los diésel (Karlström et al., 2019). Aún con todo, puede observarse que es una gran alternativa como combustible, pues sus características son competitivas con respecto al diésel. Conviene, por tanto, desarrollar esta tecnología, la cual avanza muy lentamente en la actualidad.

Tabla 10: Comparación entre camiones diésel, de batería y de hidrógeno (D.-Y. Lee et al., 2018)

CRITERIO	DIÉSEL	BATERÍA	FCV
Emisiones de escape	Si	No	No
Coste total (€)	98.000/110.500	132.000/482.270	111.290/206.017
Eficiencia del tanque (%)	86	55,3	76
Consumo	2,7 km/l	0,8 km/kWh	8,8-14 km/kgH ₂
Autonomía (km)	1569-3138	99-804	800-1600
Tiempo de repostaje	6-12 min	2,85-20 h	16,67 min
Energía específica (Mj/kg)	42,9	0,43-0,79	118

4.3. Utilización de energías renovables para reducir emisiones

Las fuentes de energía renovable ofrecen un potencial de disminución de las emisiones de carbono del transporte y de la generación de energía. La adopción de los vehículos eléctricos y de hidrógeno contribuyen a reducir estas emisiones, pero si además la procedencia de estas energías es limpia, entonces estos serán mucho más beneficiosos para el medio ambiente. Sin embargo, su coste continúa siendo superior al de las fuentes de energía convencionales. Por tanto, conviene analizar la integración de las energías renovables en el sector, siendo las más usadas y accesibles la energía eólica, solar y de biomasa.

4.3.1. Eólica

La energía eólica es una elección competitiva dada la reducción gradual de su precio a la par que se produce el aumento del coste de los combustibles fósiles. Siempre que se disponga del suficiente recurso eólico, las turbinas eólicas son una opción para la obtención de energía limpia. Sin embargo, debido a la alternancia de energía generada, lo más común resulta una técnica de obtención de energía híbrida por medio de una combinación del viento y del hidrógeno (**Figura 24**). Este modelo permite la generación de hidrógeno por medio de energía eólica (*Khan & Iqbal, 2009*).



Figura 24: Diagrama del sistema viento-hidrógeno (*Khan & Iqbal, 2009*)

La batería del vehículo eléctrico puede recargarse desde la red, existiendo algunos con capacidad de devolver la misma electricidad a la red, algo muy interesante cuando esta ha sido generada de forma renovable. De este modo, el sector del transporte, la energía eólica supera a la demanda total de energía. Aún con todo, se considera que la capacidad de energía renovable aumentará entre un 30-75% con los vehículos que se encuentran conectados a la red, gracias a su capacidad para almacenar energía y descargarla de nuevo a la red cuando sea preciso. Esto, a su vez, da como resultado un aumento significativo de la

capacidad de energía eólica marina y una disminución de las plantas de gas natural (Richardson, 2013).

4.3.2. Solar

La electricidad de la energía solar fotovoltaica se puede producir en cualquier lugar, lo cual proporciona un método más que interesante para integrar directamente la producción y el uso de energía en los vehículos eléctricos. De igual modo que ocurre con la energía eólica, la solar permite la obtención de hidrógeno, aunque en cantidades muy bajas. A partir de la energía solar fotovoltaica de una placa promedio, la electrólisis del agua produce unos 6000 ml de hidrógeno en algo menos de 4 horas, es decir, unos 500 gramos. Esto supone una eficiencia de tan solo el 2,35% (Wilson et al., 2014). En cuanto a los vehículos eléctricos, se ha propuesto la idea de colocar paneles fotovoltaicos en estacionamientos cercanos al vehículo, con el fin de proporcionar altas cargas diurnas. Por otro lado, el exceso de producción podría variar de forma estacional, por lo que la energía eólica no podría sustentar a los vehículos eléctricos durante todo el año. Además, el pico de producción de estos paneles varía considerablemente a lo largo del día, produciéndose su pico al mediodía (Richardson, 2013). Esto generaría unos 12,6kWh en verano y unos 3,78kWh en invierno (dependiendo de la región), lo cual bastaría más que de sobra para cumplir con las necesidades de conducción en verano, pero no en invierno. En lugares como Suiza, se considera que hasta el 50% de los vehículos podrían funcionar únicamente gracias a estos paneles. En cuanto a su precio, se considera que la energía solar fotovoltaica es un combustible más barato por kilómetro que la gasolina, pues los módulos fotovoltaicos presentan una tendencia de precios a la baja (Birnie, 2009).

4.3.3. Biomasa

La principal diferencia y ventaja de esta energía con respecto a la eólica y la solar es que puede ser usada y almacenada cuando sea necesario. Además, en el ciclo de vida de la biomasa, el CO₂ neto de la emisión es casi nula debido a la fotosíntesis verde de las plantas. Uno de los aspectos más prometedores de la biomasa es la gran conversión que permite, ya que los procesos biológicos pueden ser usados para la producción de hidrógeno. La conversión puede producirse por pirólisis o por gasificación, siendo en ambos casos el coste de producción de hidrógeno notablemente menor que por energía eólica o solar,

colocándose como un método tremendamente competitivo de obtención de hidrógeno (**Figura 25**) (Kirtay, 2011). El principal inconveniente resulta ser la producción de otros gases junto con el hidrógeno, por lo que debe de pasar por un proceso de purificación. Aún con este inconveniente, con un correcto desarrollo de esta tecnología, la biomasa puede jugar un importante papel en el desarrollo futuro de la economía del hidrógeno (Ni et al., 2006).

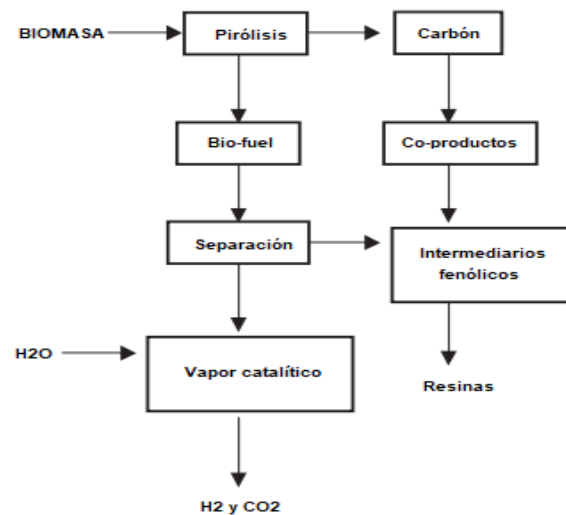


Figura 25: Conversión de biomasa a hidrógeno basada en la pirólisis (Ni et al., 2006)

La bioelectricidad se puede obtener a partir de un amplio número de materias primas, como residuos o cultivos energéticos. Estos pueden ser quemados para la obtención de energía, la cual es superior a la que se generaría usando estas materias primas como biocombustibles. Los resultados indican que las emisiones de gases de efecto invernadero, los efectos del uso de la tierra y la cantidad de materias primas de biomasa necesarias se reducen con el uso de vehículos eléctricos en comparación con los biocombustibles, pues se obtiene una mayor densidad energética. Además, su precio es mucho más bajo que el del petróleo, pudiendo llegar a desplazarlo del mercado. Sus beneficios económicos y ambientales con respecto a estos combustibles convierten a la biomasa en una clara y beneficiosa forma de obtención de energía eléctrica (Richardson, 2013).

4.4. Perspectiva de evolución del impacto ambiental

Tal y como se ha podido comprobar a lo largo del presente trabajo, los principales daños ambientales derivados del uso de vehículos provienen debido al proceso de combustión. Por

ello, en 2025 entrará en vigor la nueva y en principio última norma EURO. Según el informe de ACEA (Asociación de Constructores Europea de Automoción), la norma EURO 7 pretende la reducción de entre el 50-82% del NO_x, considerando la tecnología más adecuada como una combinación de trampas de NO_x, SCR y filtros antipartículas. Sin embargo, los valores aún no están del todo definidos, pues se contemplan dos posibles escenarios de implantación (**Tabla 11**).

Tabla 11: Posibles escenarios de la norma EURO 7 en comparación con su predecesora (ACEA)

ESCENARIO	NO _x (g/Km)	MP ₂₃ (g/km)	CO (g/km)	CH ₄ (g/km)	N ₂ O (g/km)	NH ₃ (g/km)
EURO 6	0,06/0,07	6x10 ¹⁴	1/0,5	-	-	-
EURO 7 A	0,03	1x10 ¹⁴	0,3	0,01	0,01	0,005
EURO 7 B	0,01	6x10 ¹⁴	0,1	0,005	0,005	0,002

La EURO 7 supondrá la norma más estricta hasta la fecha, tanto que muchos de los fabricantes muestran cierta preocupación por la necesidad de cumplir unos valores de emisiones que consideran inalcanzables. Por ello, fabricantes como Audi o Volvo han declarado públicamente su renuncia a seguir desarrollando vehículos de combustión para centrarse en otras tecnologías. Este es el principal objetivo de la norma, el abandono de los vehículos de combustión y la consolidación de las tecnologías eléctricas para el año 2035.

Así pues, considerando un escenario en el que los vehículos de combustión queden en segundo plano y se abre paso a los vehículos eléctricos y de hidrógeno, cabe de esperar que el total de emisiones producidas por el sector del automóvil caiga en picado en los próximos años. La principal ventaja en el uso de vehículos eléctricos o de hidrógeno con respecto a los vehículos convencionales es la reducción de las emisiones de efecto invernadero. La evolución de estas tecnologías, por tanto, debería de mostrar que esta afirmación es correcta. En el escenario más favorable, como consecuencia de esta descarbonización progresiva, las emisiones de CO₂ se verán significativamente reducidas en un 17% para 2030 y en un 45% para 2050, corroborando una mejora de la calidad ambiental (**Figura 26**). Con respecto al año 1990, supondría una reducción de entre el 85-90% de las emisiones de CO₂.

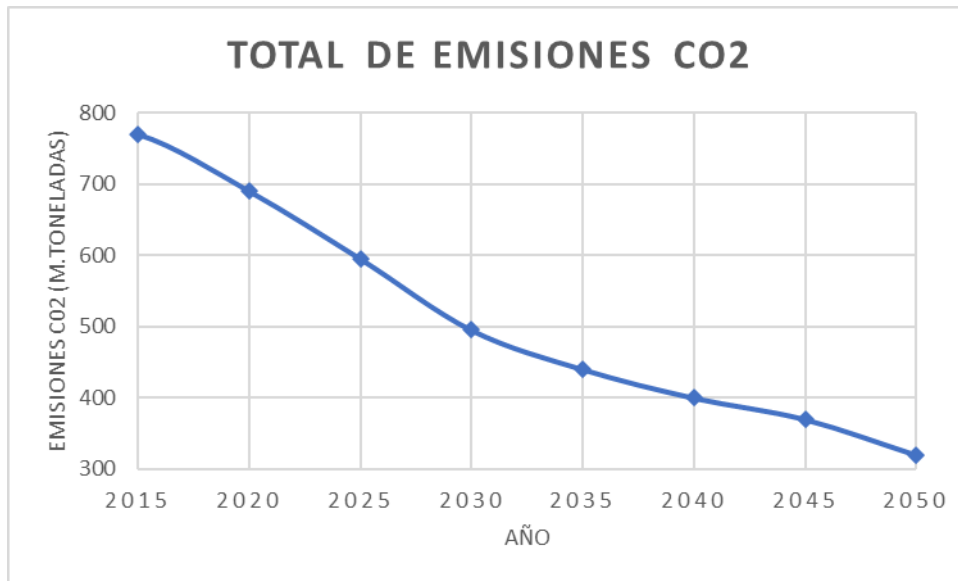


Figura 26: Evolución de las emisiones de CO₂ en vehículos ligeros en Europa (Pasaoglu et al., 2012)

En cuanto al SO₂, se produciría una particular y notable reducción de su emisión dados los avances en las tecnologías de desulfuración y a las nulas emisiones que representan los vehículos eléctricos y de hidrógeno implantados (**Figura 27**). Se consigue así un 93% de la reducción de emisiones con respecto a las cifras actuales, alcanzándose valores muy bajos, casi despreciables.

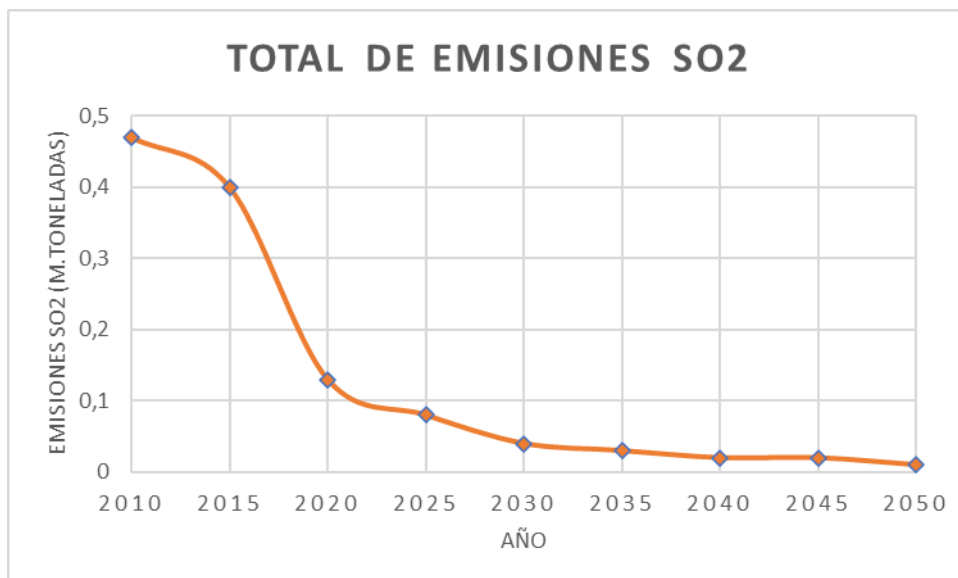


Figura 27: Evolución de las emisiones de SO₂ en vehículos ligeros en Europa (Takeshita, 2011)

El NO_x se verá ampliamente reducido debido a la estricta norma EURO 7 y a los avances de las tecnologías de EGR y de trampas de NO_x, reduciéndose entorno al 60% con respecto a los niveles emitidos por el sector en la actualidad (**Figura 28**). Pese a las mejoras tecnológicas, se considera que los vehículos EURO 6 e incluso EURO 5 seguirán presentes y aportando las mayores tasas de NO_x (Ntziachristos et al., 2016).

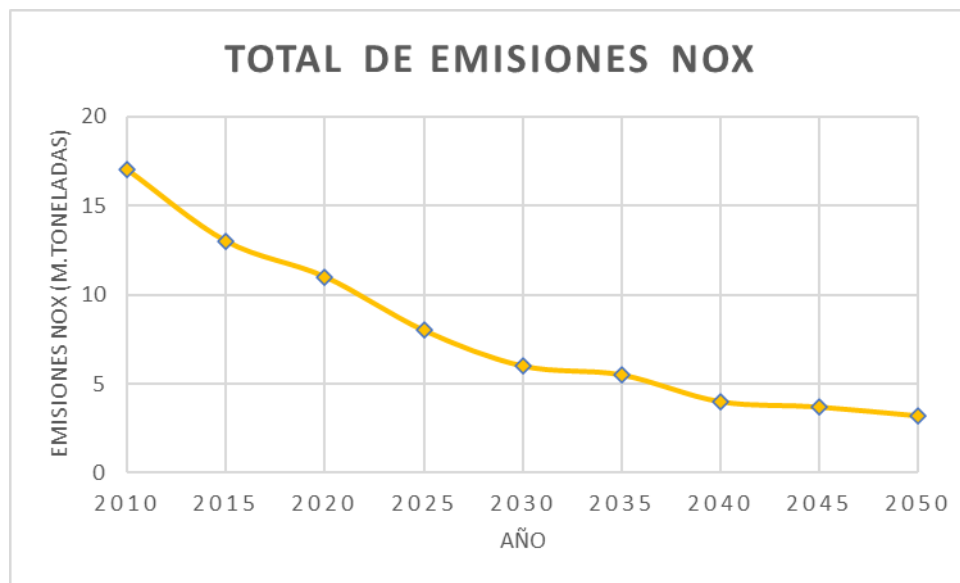


Figura 28: Evolución de las emisiones de NO_x en vehículos ligeros en Europa (Takeshita, 2011)

Uno de los agentes nocivos que va a presentar una mayor reducción con respecto a los niveles actuales es la materia particulada, pues se espera que se produzca una reducción de entorno al 82% (**Figura 29**). La limitación de partículas de menos tamaño por parte de la norma EURO 7 obligaría a los fabricantes a desarrollar aún más los filtros antipartículas y los catalizadores para retener y eliminar una mayor cantidad de partículas de diversos tamaños (Macián et al., 2021)

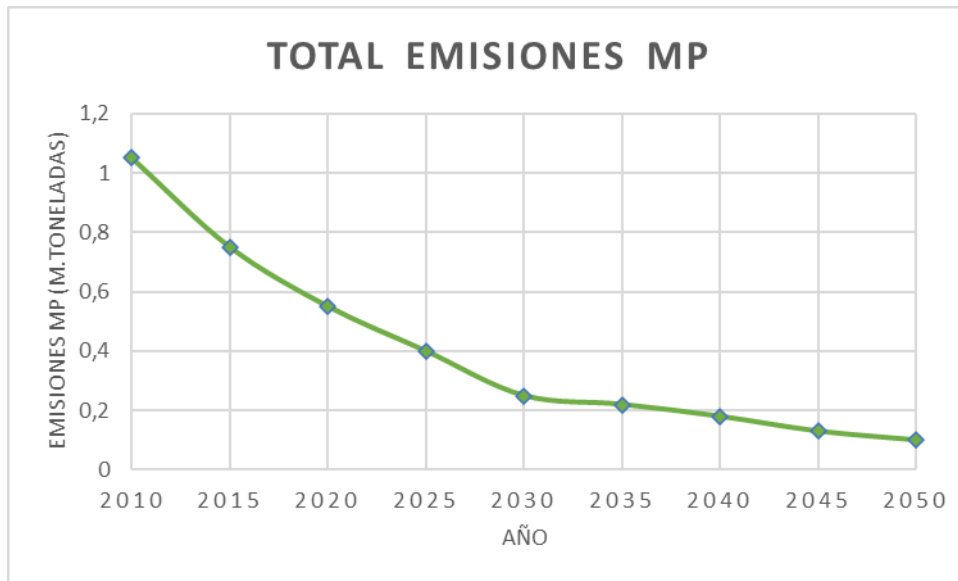


Figura 29: Evolución de las emisiones de MP en vehículos ligeros en Europa (Takeshita, 2011)

Tal y como puede observarse, este enfoque aborda el potencial técnico de reducción de emisiones, mediante la correcta electrificación y la eficiencia de dichos vehículos; a la vez que se pretende adaptar a los vehículos de combustión para cumplir con la estricta EURO 7 y poder competir con sus rivales, el vehículo de hidrógeno y el eléctrico. Cabe destacar que en estas estimaciones solo se ha tenido en cuenta las emisiones procedentes del tubo de escape, dejando de lado las emisiones producidas en los procesos de producción de los combustibles.

5- VISIÓN SOCIAL DEL SECTOR DEL AUTOMOVIL Y PERSPECTIVA DE FUTURO

Dada la actual tendencia de desarrollo y producción de las nuevas tecnologías de propulsión de los automóviles, conviene conocer cuál es la opinión de la sociedad sobre la transición hacia estos vehículos, así como diversos aspectos relacionados con la aceptación y la accesibilidad de estas tecnologías. Del mismo modo, resulta interesante conocer la evolución de estas tecnologías en el futuro y como su desarrollo puede facilitar su obtención por parte de los consumidores.

5.1. Vehículos eléctricos

5.1.1. Recepción y mercado

El vehículo eléctrico, a diferencia de lo que gran parte del sector social opina, fue creado en el siglo XIX, por lo que está lejos de ser un invento reciente. El siglo XX apuntaba a ser el periodo en el que esta tecnología se iba a consolidar, en especial después de la crisis del petróleo surgida a mediados de los 70. Sin embargo, los vehículos eléctricos no comenzaron a hacerse famosos hasta el presente reciente, cuando los problemas derivados del uso del petróleo y el agotamiento de recursos naturales supusieron un auténtico problema.

El principal punto fuerte de los vehículos eléctricos como sustitución de los vehículos de combustión son las ventajas ambientales que ofrece en comparación con estos. Dicho de otro modo, la disminución de las emisiones derivadas de la combustión al utilizar una tecnología más limpia y respetuosa con el medio ambiente. Este es el principal pilar en que se apoyan los vehículos eléctricos para hacerse un hueco en el mercado con el fin de conseguir una transición energética que aparte a los vehículos de combustión del mercado. Sin embargo, no es motivo suficiente para atraer a los consumidores debido a diversos factores, siendo el alto coste de estos vehículos en comparación con los de combustión el principal inconveniente por el que los consumidores no se decantan por ellos.

Para ello, los diferentes estados de Europa presentan diversas estrategias para fomentar esta transición y hacer a los vehículos eléctricos más atractivos para el consumidor. La principal y más importante medida es incentivar su compra mediante ayudas y subvenciones

que resulten de ayuda a los consumidores para la adquisición de vehículos eléctricos. Estas ayudas vienen generalmente a modo de reducciones o exenciones de tasas, así como a modo de primas. Sin embargo, estas ayudas pueden llegar a ser muy diferentes dependiendo del país, tal y como puede observarse en los siguientes ejemplos:

- Rumania: Incentivos de hasta 10.000 € para la compra de vehículos eléctricos.
- Eslovaquia: Incentivos de hasta 7.500 € para la compra de vehículos eléctricos.
- Dinamarca: Vehículos eléctricos exentos del impuesto de matriculación.
- Portugal: Vehículos eléctricos exentos del impuesto de registro.
- Suecia: Subsidios y bonos por adquisición de vehículos eléctricos.
- España: Reducción del impuesto anual de circulación.

Otra estrategia para incentivar el uso de vehículos eléctricos es el conocido como *carsharing*. Consiste en el alquiler de vehículos eléctricos por horas, a diferencia de la forma tradicional de alquiler de coches por días o incluso semanas. En este caso el vehículo sería depositado en una estación similar a la que se alquiló, de tal modo que solo se produciría un único viaje de ida favoreciendo el ahorro de los consumidores al librarse de los costes fijos asociados a la posesión de un vehículo a la par que provocaría una notable reducción de las emisiones al prescindir de los vehículos de combustión. Pero más allá de esto, el principal objetivo de esta estrategia es el de hacer comprender a los consumidores el correcto funcionamiento de los vehículos eléctricos y los beneficios que presentan con respecto al vehículo de combustión al mostrar su fácil conducción, la ausencia de ruido y de consumo, y que la autonomía no supone un problema para sus rutinas diarias, pues en la práctica se recorren distancias muy pequeñas. Para conocer mejor la recepción por parte de la sociedad del vehículo eléctrico y la evolución de sus ventas, el informe KPMG sobre automóviles expone la cantidad de vehículos eléctricos matriculados en el continente europeo y la evolución de las ventas en los últimos años. En 2017 las ventas de los vehículos eléctricos de batería y la de los híbridos enchufables fue de 307.400 unidades, lo que supuso un aumento de las ventas de casi el 50% con respecto al año anterior (**Figura 30**). Las ventas a nivel mundial en 2019 fueron de más de 2 millones, marcando un récord histórico. Sin embargo, aumentó con menor fuerza que los años anteriores.

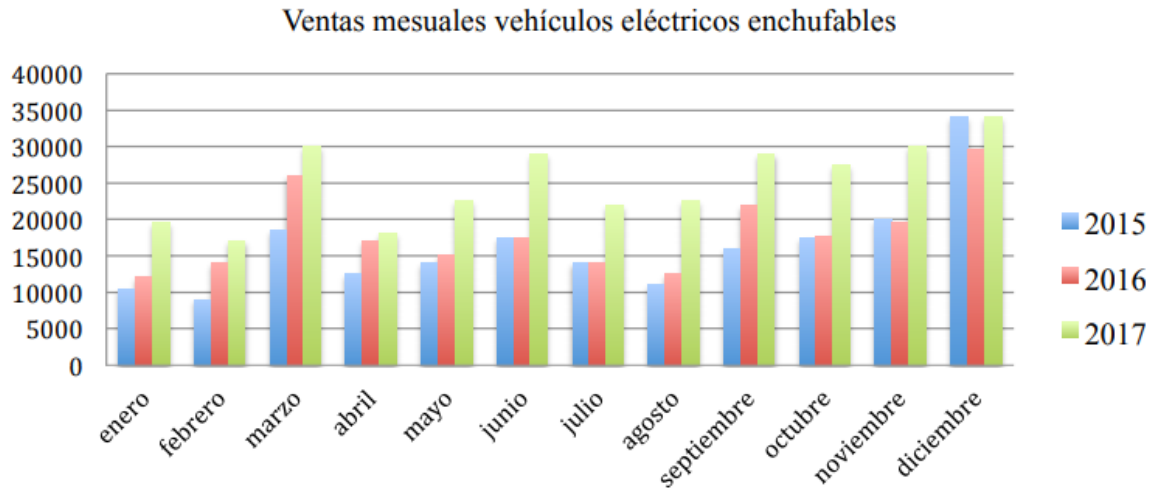


Figura 30: Ventas por mes de vehículos eléctricos enchufables en Europa (O'Neill & De, 2018)

En cuanto a los países con mayor número de vehículos eléctricos, podemos observar que los países del Norte de Europa son los que presentan una mayor instauración de esta tecnología (**Figura 31**), encontrándose España como uno de los países más reticentes a los vehículos eléctricos.

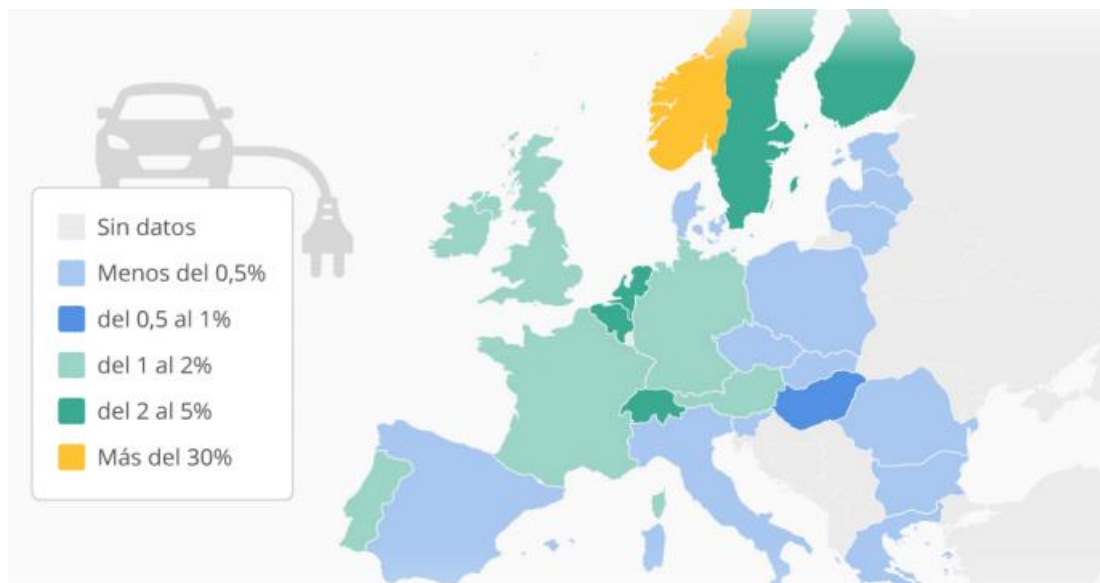


Figura 31: Matriculaciones de vehículos eléctricos en Europa con respecto al total de matriculaciones en el año 2017 (O'Neill & De, 2018)

5.1.2. Problemas de instauración del vehículo

Los principales factores que están limitando el uso de los vehículos eléctricos son la autonomía de sus baterías y la escasez de puntos de recarga.

- Puntos de recarga:

Aunque la sociedad sigue pensando que se dispone de pocos puntos de recarga, lo cierto es que en los últimos años estos puntos se han expandido por toda Europa. En el año 2018, según la RACE (Real Automóvil Club de España), se produjo un aumento significativo de los puntos de carga, existiendo más de 4.200. En la actualidad existen más de 200.000 puntos, siendo este crecimiento un claro indicativo de la actual apuesta por los vehículos eléctricos.

- Autonomía:

Si bien es cierto que los vehículos eléctricos presentan una autonomía claramente menor que la de los vehículos de combustión, el hecho de que este factor suponga un lastre para el vehículo eléctrico se debe a la mala concepción de la sociedad. Lo cierto es que los vehículos eléctricos son capaces de recorrer varias veces la distancia habitual que suele realizar una determinada persona a lo largo del día, por lo que la autonomía no supondría un verdadero problema. Incluso a la hora de realizar viajes más largos, en la actualidad es posible encontrar en el mercado diferentes opciones de vehículos que son capaces de superar los 500 km de autonomía.

Así pues, pese a que aún existe cierta reticencia al uso de vehículos eléctricos, lo cierto es que los obstáculos que en un principio impedían su expansión son cada vez más pequeños.

5.2. Vehículos de hidrógeno

5.2.1. Recepción y mercado

La existencia de los vehículos basados en la nueva tecnología de hidrógeno no está suponiendo ninguna revolución para la sociedad o, al menos, no evoluciona al ritmo que cabría esperar. Esto queda corroborado en las ventas, las cuales son escasas. En los últimos años son varios los fabricantes (como Hyundai, Toyota y Honda) que están desarrollando y poniendo en el mercado algunos modelos propulsados por hidrógeno. En el año 2017 apenas se vendieron 174 unidades de pila de combustible a nivel mundial (**Figura 32**), superando tan solo por 40 unidades las ventas del año anterior. Cabe destacar que, de todas estas ventas, solo el 10% (17 unidades) fueron en Europa.

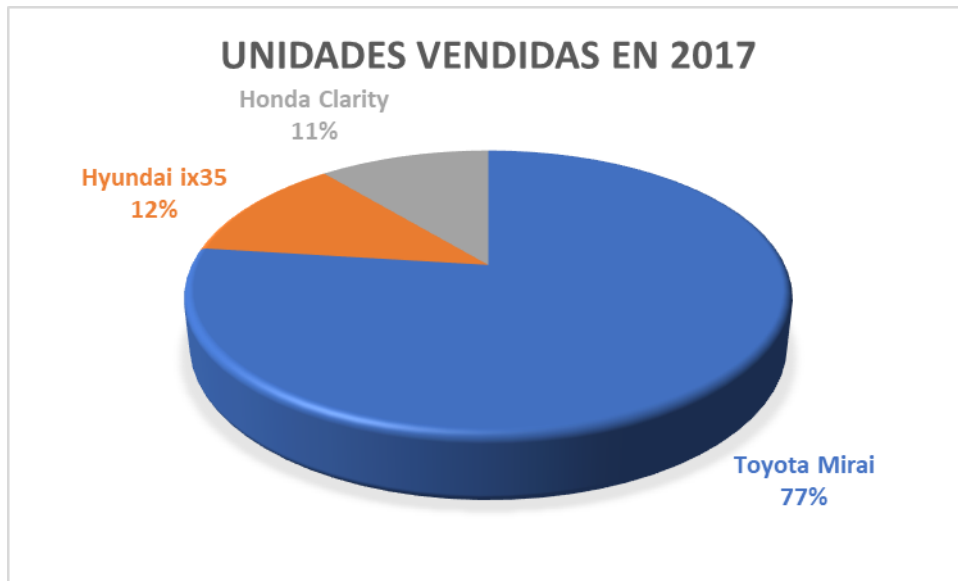


Figura 32: Unidades vendidas de vehículos de hidrógeno en 2017 (Elaboración propia)

Aún con todo, el desarrollo de las infraestructuras está propiciando el aumento de las ventas de estos vehículos. No obstante, estas evolucionan paulatinamente.

5.2.2. Problemas de instauración del vehículo

Tal y como han mostrado diferentes encuestas cuyo fin era mejorar el conocimiento sobre el uso de hidrógeno en vehículos (Germán & Navajas, 2015), el conocimiento actual sobre las tecnología de hidrógeno es muy escaso, pues gran parte de la sociedad desconoce su capacidad de ser usado como combustible alternativo y las ventajas que ello puede aportar. Sin embargo, los estudios indican que la sociedad tiende a mostrar una actitud positiva y aceptan su implantación tras ser informados sobre esta nueva tecnología en grupos formativos, pues el 89,5% de los encuestados tienen una visión positiva del hidrógeno (Figura 33).

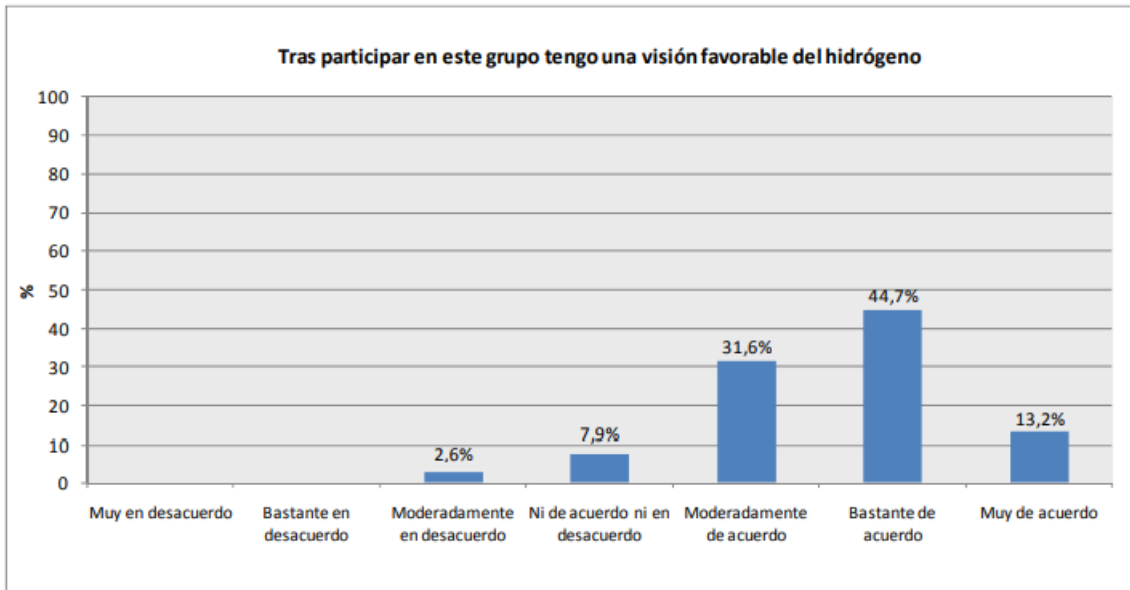


Figura 33: Visión de los encuestados sobre la tecnología de hidrógeno (Germán & Navajas, 2015)

Por otro lado, tras conocer dicha tecnología, la sociedad aprecia con diferencia dos inconvenientes concretos del hidrógeno.

- Gestión e infraestructuras:

Una de las mayores preocupaciones de los encuestados fue, en este caso, la correcta gestión del hidrógeno, pues en la actualidad hay una necesidad importante del desarrollo de las estructuras de suministro a una distancia razonable (Ajanovic & Haas, 2021). No simplemente de hidrogeneras, sino también la creación de los sistemas de distribución y producción de hidrógeno para poder cumplir con la demanda. Esto daría lugar a otro inconveniente, pues provocaría un cambio de modelo en la demanda energética para la correcta implantación de los vehículos de hidrógeno, teniéndose que modificar el sistema energético presente en la actualidad, con la elevada inversión que ello conllevaría.

- Coste:

El otro inconveniente se debe al elevado coste de los vehículos de hidrógeno, pues hoy en día están lejos de ser competitivos en comparación con los vehículos convencionales. Ya que la estructura del vehículo es muy similar a la de uno de combustión, su alto precio se debe exclusivamente al alto costo de las pilas de combustible, por lo que el precio de estos vehículos viene determinado por la evolución del precio de dichos dispositivos (Vicens

García, 2011). Así pues, se trata de una tecnología difícil de implantar, cuyos precios y limitación de infraestructuras son el principal lastre para aumentar sus ventas. Hoy en día, los vehículos basados en la pila de combustible superan con creces los 60.000 €.

5.3. Perspectivas futuras del sector

Con la tendencia actual y según el desarrollo que se espere tener en el futuro, se pueden realizar diferentes estimaciones sobre cómo evolucionará el sector del automóvil en el futuro cercano. Dado el aumento en el interés y en el desarrollo de las energías renovables, así como la actual preocupación por el estado del planeta, se tendrá en cuenta una vez más un escenario basado en el desarrollo sostenible como estimación más probable. Para ello se asume que se produce una descarbonización progresiva a la vez que se introducen más plantas de energías renovables, de tal forma que se producirá un gran impulso de los vehículos alternativos frente a los de combustión, cuyas ventas sufrirán una severa disminución (Thiel et al., 2010). Esta transición queda respaldada por un aumento de las políticas que conducen a la aceptación tanto de los vehículos eléctricos como de pila de combustible por parte de los consumidores, al convertirse en tecnologías más accesibles y contar con un mayor número de infraestructuras (Pasaoglu et al., 2012). A su vez, el precio de la electricidad y del hidrógeno será mucho más competitivo.

Un buen ejemplo de este supuesto desarrollo sostenible es la estimación que se produce en el Reino Unido, donde se espera que el 94% de los turismos vendidos y el 91% de los vehículos comerciales ligeros sean eléctricos en el año 2040, habiendo conseguido así una correcta transición energética (Figura 34).

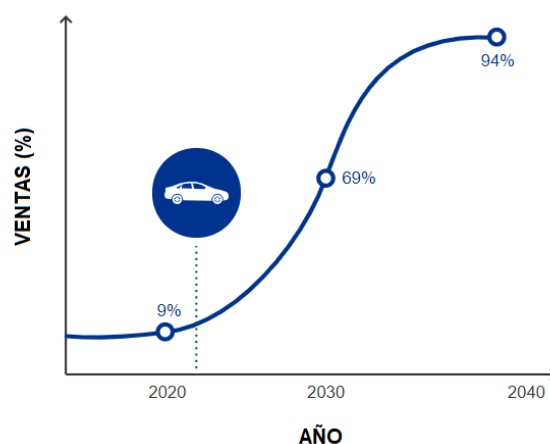


Figura 34: Evolución esperada en las ventas de vehículos eléctricos en el Reino Unido (KPMG)

Este aumento vendrá propiciado por una serie de desarrollos como la caída de los costes de los paquetes de batería, unos menores costes de funcionamiento, mejores valores residuales de los vehículos eléctricos, una mayor paridad productiva, un aumento de los puntos de recarga públicos y un mejor rendimiento de los vehículos. Según la IEA (Agencia de Energía Internacional) en el resto del continente europeo la tendencia también debería de ser al alza, aunque no de una forma tan acusada como se espera que lo sea en el Reino Unido, pues se espera que las ventas de vehículos eléctricos representen el 13,4% del total de las ventas en 2030 como consecuencia del encarecimiento del petróleo, entre otras posibles causas (Figura 35) (Thiel et al., 2010).

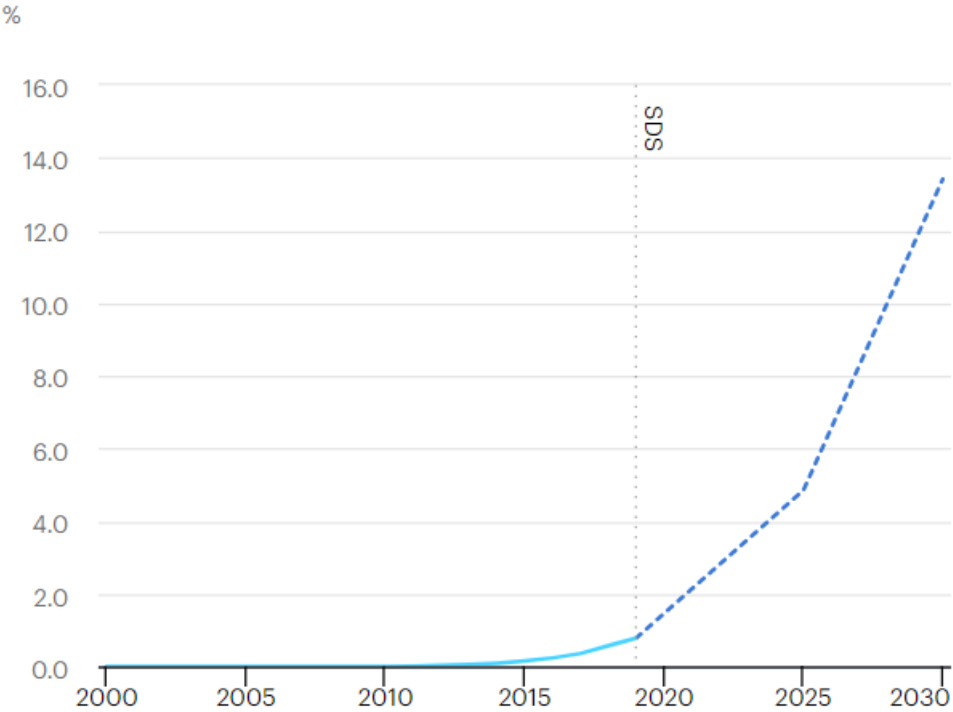


Figura 35: Evolución esperada en las ventas de vehículos eléctricos en Europa (IEA)

En cuanto a los vehículos de hidrógeno, incluso en este escenario más favorable de desarrollo sostenible se espera que el crecimiento de sus ventas no sea demasiado significativo, al menos a corto plazo. Según la IEA, se estima que el 17% de los vehículos vendidos sean de hidrógeno en el año 2050, cuando se espera que los precios de estos serán muy competitivos respecto al de sus rivales. A su vez, la demanda de hidrógeno provocará el cambio hacia unidades de producción centralizadas cuyo tamaño vendrá determinado por

las herramientas desarrolladas, las cuales permitirán un suministro a una mayor área. (Pasaoglu et al., 2012).

Así pues, para observar con mayor claridad esta transición energética, la **Figura 36** muestra la evolución de las matriculaciones de los vehículos ligeros convencionales de combustión, de los vehículos híbridos y de los que se han denominado como AEV, entre los que se incluyen los vehículos 100% eléctricos y de hidrógeno. Las ventas de los vehículos de combustión caerían al 17% convirtiéndose así en el menos común, existiendo un 55% de AEV (38% eléctricos y 17% de hidrógeno) y 28% híbridos (Krause et al., 2020). La transición tendría lugar en torno al año 2037, cuando los AEV serían los predominantes.

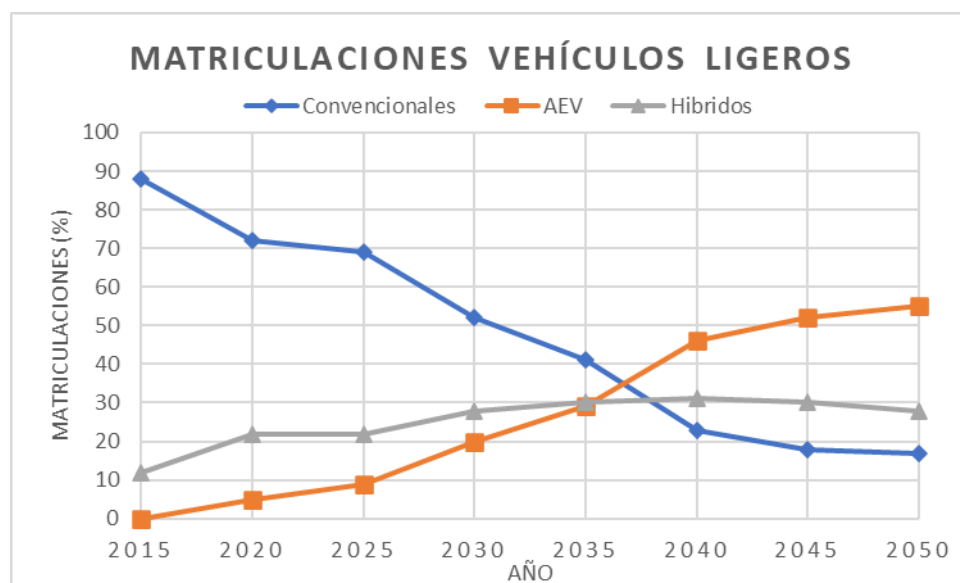


Figura 36: Evolución de las matriculaciones de vehículos ligeros en Europa (Krause et al., 2020)

Otro de los intereses de la sociedad y de los expertos es la posibilidad de introducir estas tecnologías en los vehículos pesados de transporte. Tal y como se comentó anteriormente, en la actualidad existen camiones de pila de combustible, aunque son muy escasos. Su evolución tampoco se espera que sea tan acusada como en el caso de los vehículos ligeros, en parte debido a la necesidad de completar largos trayectos comerciales, requiriendo una autonomía que actualmente solo pueden ofrecer los combustibles convencionales. Pese a todo, en 2050 se espera que existan un 72% de vehículos pesados convencionales, 13% de AEV y un 15% de vehículos híbridos (**Figura 37**).

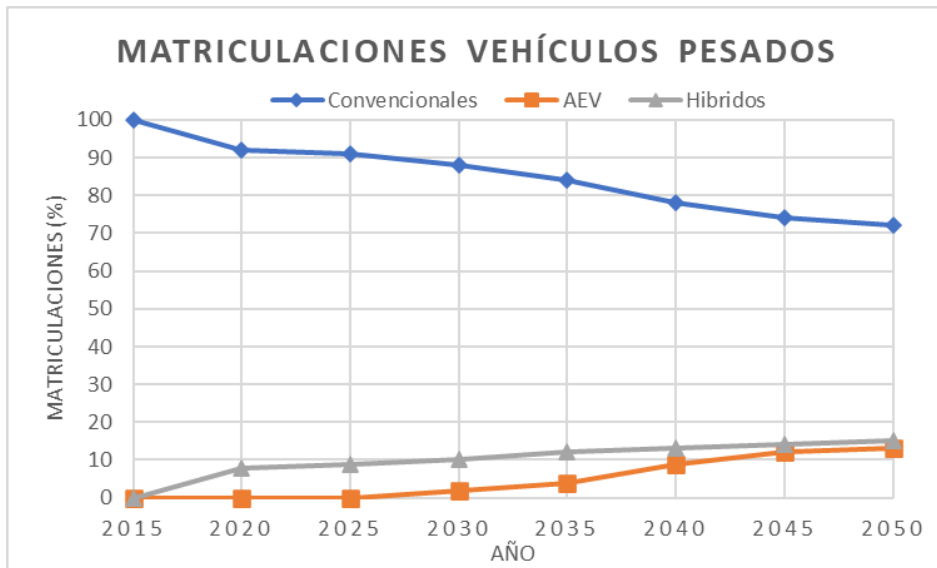


Figura 37: Evolución de las matriculaciones de vehículos pesados en Europa (Krause et al., 2020)

Sin embargo, existe cierta disparidad sobre en este caso. Un estudio (Karlström et al., 2019) determinó que en un rango de 15-20 años sería posible la producción masiva de estos. Uno de los principales criterios de decisión de este estudio fue si los camiones de pila de combustible pueden ser económicamente viables en comparación con otras alternativas, llegando a la conclusión de que en algún momento futuro su producción podría ser altamente rentable.

Teniendo en cuenta dicha estimación de desarrollo sostenible, parece que las innovaciones sociales para fomentar la movilidad en este tipo de vehículos y su desarrollo tecnológico podrían ser viables y beneficiosas en el futuro.

6- IMPACTO AMBIENTAL ASOCIADO A LA SUSTITUCIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE COMBUSTIÓN POR VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO

Ante el reciente interés generado por el hidrógeno gracias a los beneficios ambientales que puede otorgar, conviene analizar la viabilidad que tendría esta transición en el territorio español. Para ello, se ha escogido a la Región de Murcia como la Comunidad Autónoma sobre la que se realizará esta estimación basada en los datos de 2020, la cual resulta en una actualización de los resultados obtenidos en el año 2015 (*López Cascales et al., 2015*).

6.1. Estimación de la capacidad de hidrógeno

Aunque en España sigue existiendo cierta dependencia de los combustibles fósiles en la actualidad, conviene determinar la capacidad de hidrógeno que podría generarse para lograr una adecuada transición. Además, algunas energías renovables como la eólica han evolucionado a lo largo de la última década. De este modo, sería posible conocer la capacidad de sustitución de los vehículos de combustión por los FCVs en la Región de Murcia.

Este hidrógeno sería producido por medio de la electrólisis usando la energía de la red eléctrica. Para realizar esta estimación se usarán los valores de demanda energética proporcionados por la REE (Red Eléctrica Española), escogiéndose los valores de las horas muertas comprendidas entre las 10:00 p.m. y las 10:00 a.m. para evitar la sobrecarga del sistema. En estas horas de baja demanda el exceso de energía será utilizado en su totalidad para la producción de hidrógeno, el cual servirá para recargar las estaciones que serán utilizadas durante el resto del día para repostar los FCVs. Con el fin de realizar una estimación lo más cercana posible a la realidad, se han escogido dos semanas de distintas estaciones, del 20 al 26 de julio y del 21 al 27 de diciembre, para el cálculo del exceso de energía en las horas de baja demanda (**Figura 38 y 39**). Para ello, se ha confeccionado un trapecio cuya área es representativa de la cantidad de energía en exceso que podría producirse durante dichas horas de baja demanda la cual ha sido calculada para cada día dando una media aproximada de 175 GWh.

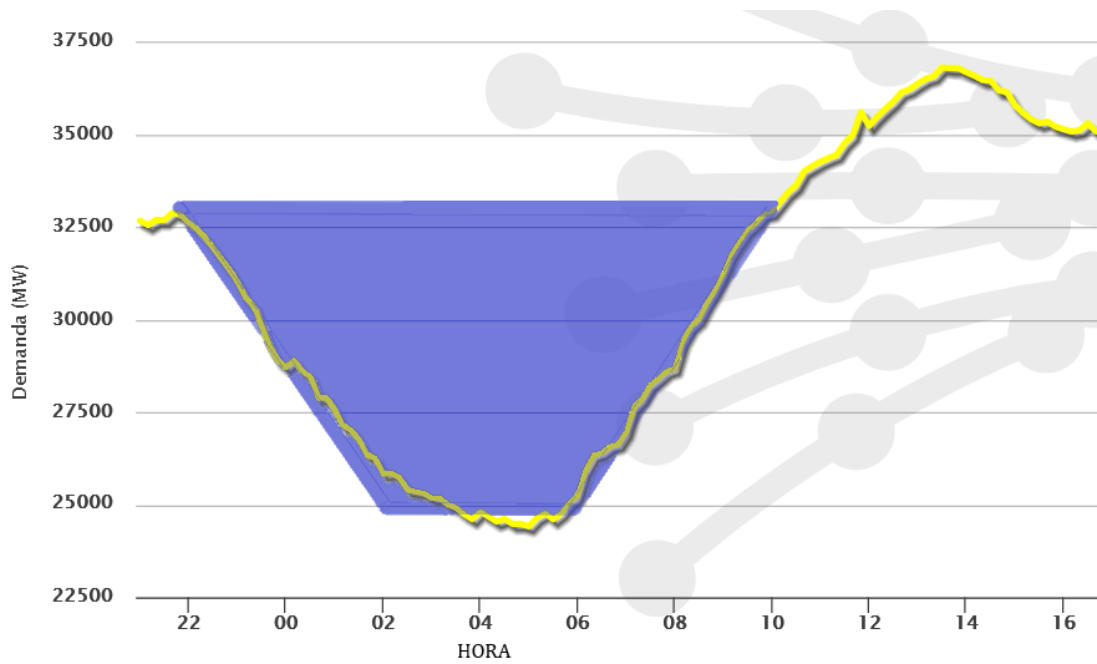


Figura 38: Exceso de demanda de energía del 21 de julio de 2020 (REE)

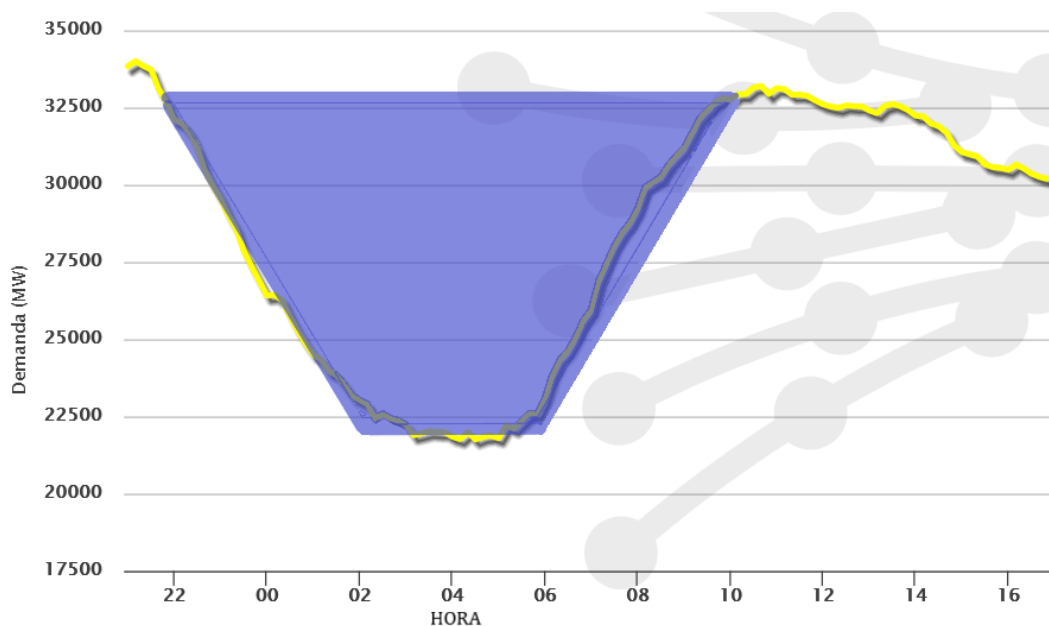


Figura 39: Exceso de demanda de energía del 22 de diciembre de 2020 (REE)

Dado el *mix* energético español en el año 2020, el 22,2% de esta energía sería de origen nuclear, el 21,9% eólica, el 17,5% de ciclo combinado, el 12,2% hidráulica, el 10,7% por cogeneración, el 7,9% solar y el 2% procedente del carbón. El aumento de las energías renovables con respecto al artículo de referencia (López Cascales et al., 2015) se debe principalmente al aumento de la energía eólica, en especial en las horas valle escogidas, ya

que durante estos periodos no se produce energía a partir de las plantas fotovoltaicas. Estos datos son a nivel nacional, por lo que podrá estimarse la cantidad de esta energía disponible para la Región de Murcia por medio de su población. Según el INE (Instituto Nacional de Estadística) la población de la Región de Murcia representa el 3,18% de la población total del territorio nacional, por lo que se estima que de estos 175 GWh estarían disponibles 5,41 GWh al día.

Para estimar la capacidad de hidrógeno se debe de diseñar una estación modelo. Para ello se consideran estaciones como las del artículo de referencia, pues se considera que las características técnicas de los aparatos que las conforman no han evolucionado en exceso durante los últimos años. Se estima así que en dichas estaciones serían necesarios 5,7 kWh para la obtención de un Nm³ de hidrógeno (**Tabla 12**).

Tabla 12: Energía proporcionada por los diferentes componentes del modelo de estación (López Cascales et al., 2015)

	kW	Nm³/h	kWh/Nm³
Electrolizador alcalino (NITIDOR)	500	100	5
Purificador (IDROENERGY)	0,5	15	0,033
Compresor (PdC Machines)	22,5	46	0,489
Dispositivos auxiliares (tratamiento de agua)	-	-	0,18
TOTAL			5,7

Es decir, con la cantidad de energía disponible en la Región de Murcia podrían obtenerse 949.122 Nm³ de hidrógeno todos los días sin generar la sobrecarga de la red eléctrica.

6.2. Sustitución por FCVs

En base a la disponibilidad de hidrógeno que se ha estimado, es posible determinar la cantidad de FCVs que podrían sustituir a los vehículos de combustión. Para ello, se ha elegido al Toyota Mirai como el vehículo de referencia para esta transición. Se trata de una fuerte apuesta por parte de la marca nipona para introducir el FCV en nuestra sociedad, mediante un vehículo de cero emisiones, silencioso y basado plenamente en el hidrógeno

como método para obtener electricidad. Las especificaciones del vehículo vienen indicadas en la **Tabla 13**.

Tabla 13: Especificaciones del Toyota Mirai (Toyota)

Potencia	128 kW
Tanque	5,6 kg
Consumo	0,8 kg/100 km
Consumo por km	0,089 Nm ³
Autonomía	700 km
Emisiones WLTP CO₂	0 g/km

Según los datos proporcionados por la Comisión Europea (Eurostat), un vehículo recorre de media unos 50 km al día. Es decir, ya que el modelo de FCV escogido como referencia consume 0,8 kg/100 km, el consumo diario no debería de ser superior a los 0,4 kg de hidrógeno. A su vez, como consume 0,089 Nm³/km, se consumirían 4,45 Nm³ diarios de hidrógeno. Por tanto, dado que la capacidad de hidrógeno para la Región de Murcia es de 949.122 Nm³, se estima que podrían repostar diariamente unos 213.285 FCVs. La DGT (Dirección General de Tráfico) considera 784.115 turismos en la Comunidad Autónoma en su actualización más reciente (2019). Esto significaría que el 27,20% de los vehículos podrían ser sustituidos. Cabe destacar que los datos proporcionados por la DGT son de un año atrás con respecto al resto de las estimaciones.

6.3. Efectos contaminantes

Tal y como se ha podido observar en los apartados anteriores del presente trabajo, la sustitución de los combustibles fósiles por el hidrógeno presenta notables beneficios en términos de emisiones contaminantes. Sin embargo, se debe de realizar una evaluación realista de las emisiones asociadas a la producción de este hidrógeno. Para ello, se usarán una vez más los datos de emisión de CO₂ proporcionados por la REE (Red Eléctrica Española) vinculados a la energía producida. Según la REE, para el mismo rango de horas, los valores medios de emisión serían de unos 0,124 kg/kWh. El 62,64% de estas emisiones vendrían asociadas a las plantas de ciclo combinado, el 24,35% a la cogeneración y a los residuos

producidos y tan solo el 6% al carbón. Se puede observar una clara disminución de las emisiones con respecto a los valores de 2015, los cuales difieren sustancialmente en la procedencia de estas emisiones, mostrándose una notable reducción de las emisiones procedentes del carbono.

En cuanto a las emisiones desde el tubo de escape, se tendrá en cuenta la legislación vigente en 2020 por la que ningún vehículo nuevo podía superar los 95 g/km de CO₂, lo cual puede traducirse a 9,5 kg de CO₂ cada 100 km. También ha de tenerse en cuenta el CO₂ emitido durante la producción del combustible, el cual se estima en unos 0,36 kg por litro producido, según la compañía Repsol (*López Cascales et al., 2015*). Por tanto, considerando una media de consumo en unos 7 l a los 100 km (lo cual aportaría 2,52 kg de CO₂); se puede determinar que se generan en total unos 12,02 kg de CO₂ por cada 100 km.

En un FCV se consumen 8,9 Nm³ de hidrógeno por cada 100 km; lo cual requiere el uso de 50,72 kWh de energía por parte del electrolizador. Dado que en las horas de menor demanda se han estimado unos valores de emisiones de 0,124 kg/kWh, se puede determinar que el FCV produce en total unos 6,29 Kg de CO₂ por cada 100 km. Estos datos contrastan con los del artículo de referencia, en el cual se mencionaba que los niveles de emisión podían ser mayores en los FCV si se tenían en cuenta las versiones híbridas o incluso los modelos de combustión con menores tasas de consumo (*López Cascales et al., 2015*). Este cambio se debe principalmente al *mix* energético español, el cual ha avanzado en términos de sostenibilidad al haber aumentado la tasa de generación de energía renovable con respecto a los valores de 2015, lo cual se traduce en una disminución de las emisiones asociadas a la obtención de energía. Por otro lado, el consumo del Toyota Mirai resulta hasta un 30% menor que el del Honda Clarity utilizado en el artículo de referencia. Esto resulta un claro indicativo tanto del desarrollo de los vehículos de hidrógeno como de su adecuada implementación junto con las energías renovables.

Finalmente, para poder observar como de beneficiosa podría llegar a ser esta transición, conviene determinar la cantidad de CO₂ que se dejarían de emitir cada año mediante la sustitución de esos 213.285 vehículos:

$$CO_2 \left(\frac{kg}{año} \right) = \frac{ICVe - FCVe}{2} * 365 \text{ días} * 213.285 \text{ FCV} = 223.037.456 \text{ kg}$$

Donde ICVe y FCVe se corresponden con la emisión del vehículo de combustión (12,02 kg) y del vehículo de hidrógeno (6,29 kg) respectivamente, tras recorrer una distancia de 100 km, por lo que estos valores deben de dividirse por 2 para corresponderse a la media diaria de 50 km. Por tanto, considerando que serían 213.285 FCV los que podrían repostar todos los días, se estima que las emisiones podrían reducirse en unas 223.000 TM (toneladas métricas) de CO₂ cada año.

Tras todo esto, resulta interesante la comparación de la eficiencia entre un FCV y un EV en términos de contaminación. Para ello, se utilizará como modelo de EV al Renault Zoe. Así pues, considerando nuevamente los 5,41 GWh disponibles, que este vehículo utiliza unos 14,2 kWh cada 100 km y que los trayectos diarios no serán superiores a los 50 km, se llegaría a la conclusión de que 761.971 EVs podrían ser recargados cada día en la Región de Murcia. Por tanto, ya que se consumen 14,2 kWh cada 100 km y que se emiten 0,124 kg/kwh, el CO₂ emitido en la producción de energía para recargar las baterías sería de 1,76 kg de CO₂ por cada 100 km. En este contexto en el que existen 784.115 vehículos de combustión se puede observar que se podría considerar la sustitución de casi el 100% de los vehículos, los cuales reducirían notablemente las emisiones de CO₂.

$$CO_2 \left(\frac{kg}{año} \right) = \frac{ICVe - EVe}{2} * 365 \text{ días} * 761.971 \text{ EV} = 1.426.752.599 \text{ kg}$$

Donde ICVe y EVe se corresponden con la emisión del vehículo de combustión (12,02 kg) y del vehículo eléctrico (1,76 kg) respectivamente, tras recorrer una distancia de 100 km, por lo que estos valores deben de dividirse por 2 para corresponderse a la media diaria de 50 km. Por tanto, considerando que serían 761.971 EVs los que podrían repostar todos los días, se estima que las emisiones podrían reducirse en unas 1.420.000 TM de CO₂ cada año. La mejora en la calidad del medio ambiente considerando el *mix* energético actual sería más que satisfactoria. Además, la implantación de estos vehículos tendría una fuerte influencia en la importación de crudo.

Si tomamos como referencia los datos de emisiones obtenidos en el artículo de referencia (*López Cascales et al., 2015*) y los obtenidos en el presente trabajo, es posible obtener una estimación de la reducción de emisiones de CO₂. Para el año de este estudio de referencia, teniendo en cuenta el consumo y el número de vehículos, se estimó que los vehículos de combustión interna emitían unos 2.708.125.165 kg de CO₂ al año. En el presente trabajo, teniendo en cuenta que los vehículos de combustión emiten en total unos 12,02 kg de CO₂ cada 100 km, los 784.115 turismos existentes en la Comunidad Autónoma emitirían 1.720.161.616 kg de CO₂ al año. De haberse producido su sustitución por el número de FCVs estimados, el total de emisiones de CO₂ se habría visto reducido en unos 223.000 - 24.500 toneladas métricas al año desde el artículo de referencia hasta la actualidad, lo cual supondría una disminución de entre el 12,96% y el 0,9% del total de emisiones por año. En el caso de los EVs, las emisiones de CO₂ se verían reducidas en unos 2.200.000 - 1.420.000 toneladas métricas al año desde el artículo de referencia hasta la actualidad, lo cual supondría una disminución de entre el 82,94% y el 81,23% del total de emisiones por año.

Partiendo de vehículos de combustión con un consumo de 7 l por cada 100 km (3,5 l/50km) y que 100 l de combustible pueden ser producidos a partir de un único barril, la Región de Murcia podría reducir la factura petrolera entre 7.464 y 26.668 barriles por día, considerando que sean sustituidos por FCVs o EVs respectivamente. Si se extrapolan estos valores a España a través de su población, el ahorro se situaría entre los 234.716 y los 838.647 barriles de crudo por día. Sobre la base de que en España se consumen unos 1,1 millones de barriles al día, esto supondría una reducción de entre el 21,33% y el 76,24% y un ahorro de entre 13.139.280 y 46.963.840 € al día, si se considera un precio por barril de unos 56 € (tal y como marca la web datos macro).

7- CONCLUSIONES

Tras abordar el presente trabajo, se pueden alcanzar una serie de conclusiones:

- 1- Los vehículos de combustión provocan una gran disminución en la calidad del medio ambiente y en la salud de la flora y fauna asociada a él, debido a las emisiones que estos vehículos registran durante todo su ciclo de vida.
- 2- Existen diversas tecnologías que permiten adaptarse a los vehículos de combustión para lograr unos mejores valores de emisiones. Sin embargo, el vehículo de combustión se encuentra en grave peligro de cara al futuro. El escenario de evolución de otras tecnologías alternativas, la aparición de normas sobre emisiones cada vez más restrictivas y la continua tendencia al alza de los precios del petróleo han provocado que muchas marcas hayan decidido centrarse en el desarrollo de vehículos alternativos.
- 3- Los EVs y FCVs son las dos alternativas más valoradas para el futuro, pues consiguen una clara disminución de las emisiones en todos los apartados. Sin embargo, aún existen ciertas diferencias entre los expertos, incapaces de decidirse por uno de ellos como la el más limpio. Los EVs enchufables son los que obtiene los mejores resultados de emisiones. Sin embargo, el enorme interés por los FCVs como alternativa a los vehículos de combustión está cogiendo fuerza en los últimos años, principalmente por presentar una mayor autonomía que sus competidores. Aún con todo, como se ha podido observar, se trata de una tecnología muy verde aún, pues no cuenta con las infraestructuras necesarias para su implantación ni se ha extraído todo su potencial.
- 4- Lo que si ha podido quedar claro es la alta influencia de las energías renovables en las emisiones, siendo totalmente aconsejable el desarrollo de estas junto con el de los vehículos alternativos.
- 5- Tras haber determinado un escenario en el que las estaciones son recargadas durante las horas de menor actividad, y considerando el consumo y emisiones de vehículos de combustión, EVs y FCVs; se ha determinado que los vehículos de la Región de Murcia podrían ser sustituidos en casi un 30% por FCVs y en casi un 100% por EVs, lo cual conllevaría a una notable reducción de las emisiones y del uso de petróleo, de tal forma que se produciría además un importante ahorro económico.

8- BIBLIOGRAFÍA

Ajanovic, A., & Haas, R. (2021). Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10049-10058. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.122>

Álvarez, M. J. (2007). *Impacto ambiental de automóviles medianos utilizando modelos de ciclo de vida*. <https://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/596>

Amza, G., Apostolescu, Z., Iliescu, M., Garac, Z., Paise, S., & Groza, M. (2011). Applied ecotechnological issues for recycling cars. *Proceedings of the 13th WSEAS international conference on mathematical methods, computational techniques and intelligent systems, and 10th WSEAS international conference on non-linear analysis, non-linear systems and chaos, and 7th WSEAS international conference on dynamical systems and control, and 11th WSEAS international conference on Wavelet analysis and multirate systems: recent researches in computational techniques, non-linear systems and control*, 33-38.

Azqueta Oyarzún, D., & Delacámara, G. (2008). *El costo ecológico de la extracción de petróleo: Una simulación*. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/11243>

Ball, W. T., Alsing, J., Mortlock, D. J., Staehelin, J., Haigh, J. D., Peter, T., Tummon, F., Stübi, R., Stenke, A., Anderson, J., Bourassa, A., Davis, S. M., Degenstein, D., Frith, S., Froidevaux, L., Roth, C., Sofieva, V., Wang, R., Wild, J., ... Rozanov, E. V. (2018). Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(2), 1379-1394. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1379-2018>

Ballester Díez, F., Tenías, J. M., & Pérez-Hoyos, S. (1999). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: Una introducción. *Revista Española de Salud Pública*, 73, 109-121. <https://doi.org/10.1590/S1135-57271999000200002>

Bellmann, K., & Khare, A. (2000). Economic issues in recycling end-of-life vehicles. *Technovation*, 20(12), 677-690. [https://doi.org/10.1016/S0166-4972\(00\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0166-4972(00)00012-2)

Birnie, D. P. (2009). Solar-to-vehicle (S2V) systems for powering commuters of the future. *Journal of Power Sources*, 186(2), 539-542. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.09.118>

Bravo, E. (2007). *Impactos de la explotación petrolera*. 61.

Cala, V., & Kunimine, Y. (2003). DISTRIBUCIÓN DE PLOMO EN SUELOS CONTAMINADOS EN EL ENTORNO DE UNA PLANTA DE RECICLAJE DE BATERÍAS ÁCIDAS. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19(3), 109-115.

Cunanan, C., Tran, M.-K., Lee, Y., Kwok, S., Leung, V., & Fowler, M. (2021). A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. *Clean Technologies*, 3(2), 474-489. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3020028>

D'Adamo, I., Gastaldi, M., & Rosa, P. (2020). Recycling of end-of-life vehicles: Assessing trends and performances in Europe. *Technological Forecasting and Social Change*, 152, 119887. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119887>

Darquea, D. G. P. (2018). Estudio de emisiones contaminantes utilizando combustibles locales. *INNOVA Research Journal*, 3(3), 23-34. <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n3.2018.635>

Díaz, S., & Soto, H. (2019). Evaluación preliminar de emisiones de plomo en automóviles. *Contribuciones Científicas y Tecnológicas*, 84, 21-25.

Elliott, T., Hudson, J., Gillie, H., Watson, S., Lugal, L., & Almasi, A. (2019). *Final Report on the Implementation of Directive 2000/53/EC on End-of-Life Vehicles*. 77.

Fontaras, G., Franco, V., Dilara, P., Martini, G., & Manfredi, U. (2014). Development and review of Euro 5 passenger car emission factors based on experimental results over various driving cycles. *Science of The Total Environment*, 468-469, 1034-1042. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.043>

Gabriel-Buenaventura, A., & Azzopardi, B. (2015). Energy recovery systems for retrofitting in internal combustion engine vehicles: A review of techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 955-964. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.083>

Galante Marcos, A. (2011). *Protocolo de Kioto y desarrollo sostenible*. <https://doi.org/10.14198/cdbio.2011.34.03>

Gao, J., Tian, G., & Sorniotti, A. (2019). On the emission reduction through the application of an electrically heated catalyst to a diesel vehicle. *Energy Science & Engineering*, 7(6), 2383-2397. <https://doi.org/10.1002/ese3.416>

Germán, S., & Navajas, J. (2015). *Percepción y Aceptación Pública de las Tecnologías del Hidrógeno. Un estudio Exploratorio*. <http://documenta.ciemat.es/handle/123456789/177>

Grennfelt, P., Engleryd, A., Forsius, M., Hov, Ø., Rodhe, H., & Cowling, E. (2020). Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy. *Ambio*, 49(4), 849-864. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01244-4>

Joseph, J., Pachamuthu, S., Solomon, J. M., & Sathyamurthy, R. (2021). Experimental investigation to enhance the low-temperature nitrogen oxide emission reduction in biodiesel exhaust using selective catalytic reduction with direct ammonia injection and manganese cerium zirconia catalyst. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, n/a(n/a), e13622. <https://doi.org/10.1002/ep.13622>

Karlström, Pohl, Grauers, & Holmberg. (2019). *Fuel Cells for Heavy-duty Trucks 2030 2019-604*. <https://energiforsk.se/en/programme/technology-watch-in-fuel-cells/reports/fuel-cells-for-heavy-duty-trucks-2030-2019-604/>

Kawamoto, R., Mochizuki, H., Moriguchi, Y., Nakano, T., Motohashi, M., Sakai, Y., & Inaba, A. (2019). Estimation of CO₂ Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA. *Sustainability*, 11(9), 2690. <https://doi.org/10.3390/su11092690>

- Khan, M. J., & Iqbal, M. T. (2009). Analysis of a small wind-hydrogen stand-alone hybrid energy system. *Applied Energy*, 86(11), 2429-2442. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.10.024>
- Kitazume, C., Kohlmeyer, R., & Oehme, D. I. (2020). *Effectively tackling the issue of millions of vehicles with unknown whereabouts*. 11.
- Kirtay, E. (2011). Recent advances in production of hydrogen from biomass. *Energy Conversion and Management*, 52(4), 1778-1789. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.010>
- Krause, J., Thiel, C., Tsokolis, D., Samaras, Z., Rota, C., Ward, A., Prenninger, P., Coosemans, T., Neugebauer, S., & Verhoeve, W. (2020). EU road vehicle energy consumption and CO2 emissions by 2050 – Expert-based scenarios. *Energy Policy*, 138, 111224. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111224>
- Kume, A., Kotani, K., & Mizuochi, H. (2013). Development of Control Technology for i-ELOOP. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(21), 706-710. <https://doi.org/10.3182/20130904-4-JP-2042.00142>
- Kurtz, J., Sprik, S., & Bradley, T. H. (2019). Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 12010-12023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.027>
- L**ee, D.-Y., Elgowainy, A., Kotz, A., Vijayagopal, R., & Marcinkoski, J. (2018). Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks. *Journal of Power Sources*, 393, 217-229. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.012>
- Lee, J., Theis, J. R., & Kyriakidou, E. A. (2019). Vehicle emissions trapping materials: Successes, challenges, and the path forward. *Applied Catalysis B: Environmental*, 243, 397-414. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.10.069>
- Lopatin, O. P. (2020). Gas-diesel engine exhaust gas recirculation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 548, 062023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062023>
- López Cascales, J. J., Juan-Segovia, M. C., Ibáñez Molina, J., Sánchez Vera, J., & Vivo Vivo, P. M. (2015). Environmental impact associated with the substitution of internal combustion vehicles by fuel cell vehicles refueled with hydrogen generated by electrolysis using the power grid. An estimation focused on the Autonomous Region of Murcia (Spain). *Renewable Energy*, 77, 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.082>
- Lovejoy, T. E. (2006). *Climate Change and Biodiversity*. The Energy and Resources Institute (TERI).
- M**acián, V., Monsalve-Serrano, J., Villalta, D., & Fogué-Robles, Á. (2021). Extending the potential of the dual-mode dual-fuel combustion towards the prospective EURO VII emissions limits using gasoline and OMEx. *Energy Conversion and Management*, 233, 113927. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113927>
- Mahmoudzadeh Andwari, A., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R., & Esfahanian, V. (2017). A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 414-430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.138>

Manoharan, Y., Hosseini, S. E., Butler, B., Alzahrani, H., Senior, B. T. F., Ashuri, T., & Krohn, J. (2019). Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect. *Applied Sciences*, 9(11), 2296. <https://doi.org/10.3390/app9112296>

Miller, D. J., Wojtal, P. K., Clark, S. C., & Hastings, M. G. (2017). Vehicle NO_x emission plume isotopic signatures: Spatial variability across the eastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(8), 4698-4717. <https://doi.org/10.1002/2016JD025877>

Ni, M., Leung, D. Y. C., Leung, M. K. H., & Sumathy, K. (2006). An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Processing Technology*, 87(5), 461-472. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.11.003>

Ntziachristos, L., Papadimitriou, G., Ligterink, N., & Hausberger, S. (2016). Implications of diesel emissions control failures to emission factors and road transport NO_x evolution. *Atmospheric Environment*, 141, 542-551. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.036>

Nurrohim, A., & Sakugawa, H. (2005). Fuel-based inventory of NO_x and SO₂ emissions from motor vehicles in the Hiroshima Prefecture, Japan. *Applied Energy*, 80(3), 291-305. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.04.003>

O'Neill, S., & De, M. (2018). *El vehículo eléctrico, el carsharing como forma de implantarlo y el vehículo de hidrógeno. Europa*. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/22372>

Ordóñez, C. P., & Guerra, J. P. (2011). *ESTUDIO DE BATERÍAS PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS*. 105.

Pardos, J. A. (2006). *La contaminación atmosférica y los ecosistemas forestales*. 16.

Pasaoglu, G., Honselaar, M., & Thiel, C. (2012). Potential vehicle fleet CO₂ reductions and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in Europe. *Energy Policy*, 40, 404-421. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.10.025>

Ragosta, G., Musto, P., Martuscelli, E., Russo, P., & Zeloni, L. (2000). Recycling of plastic car components: The case of a multilayer item based on polypropylene. *Journal of Materials Science*, 35(15), 3741-3751. <https://doi.org/10.1023/A:1004808809422>

Richardson, D. B. (2013). Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 247-254. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.042>

Rood, S., Eslava, S., Manigrasso, A., & Bannister, C. (2020). Recent advances in gasoline three-way catalyst formulation: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(4), 936-949. <https://doi.org/10.1177/0954407019859822>

Rosenfeld, D. C., Lindorfer, J., & Fazeni-Fraisl, K. (2019). Comparison of advanced fuels—Which technology can win from the life cycle perspective? *Journal of Cleaner Production*, 238, 117879. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117879>

Rovira, A., & Muñoz, M. (2015). *MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA*. Editorial UNED.

Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature News*, 531(7595), 435. <https://doi.org/10.1038/531435a>

Sun, C., Liu, Y., Qiao, X., Ju, D., Tang, Q., Fang, X., & Zhou, F. (2020). Experimental study of effects of exhaust gas recirculation on combustion, performance, and emissions of DME-biodiesel fueled engine. *Energy*, *197*, 117233. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117233>

Takeshita, T. (2011). Global Scenarios of Air Pollutant Emissions from Road Transport through to 2050. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *8*(7), 3032-3062. <https://doi.org/10.3390/ijerph8073032>

Tan, L., Guo, Y., Liu, Z., Feng, P., & Li, Z. (2019). An investigation on the catalytic characteristic of NOx reduction in SCR systems. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *99*, 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.02.020>

Thiel, C., Perujo, A., & Mercier, A. (2010). Cost and CO2 aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios. *Energy Policy*, *38*(11), 7142-7151. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.034>

Tollefson, J. (2010). Hydrogen vehicles: Fuel of the future? *Nature*, *464*(7293), 1262-1264. <https://doi.org/10.1038/4641262a>

Tzankiozis, T., Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2010). Diesel passenger car PM emissions: From Euro 1 to Euro 4 with particle filter. *Atmospheric Environment*, *44*(7), 909-916. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.12.003>

Vicens Garcia, G. (2011). *Vehículos de hidrógeno. Perspectivas de futuro*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/15543>

Viñoles, R., Bastante, C., López, R., Vivancos, J., & Capuz, S. (2014). ANÁLISIS DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE UN AUTOMÓVIL, A LO LARGO DE SU CICLO DE VIDA. *Ingeniería del agua*, *18*(1), ix. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3293>

Weiss, M., Bonnel, P., Kühlwein, J., Provenza, A., Lambrecht, U., Alessandrini, S., Carriero, M., Colombo, R., Forni, F., Lanappe, G., Le Lijour, P., Manfredi, U., Montigny, F., & Sculati, M. (2012). Will Euro 6 reduce the NOx emissions of new diesel cars? – Insights from on-road tests with Portable Emissions Measurement Systems (PEMS). *Atmospheric Environment*, *62*, 657-665. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.056>

Wilson, J., Srinivasan, S., Moore, B., Henderson, L., III, S., & Sharma, P. (2014). Hydrogen Production Using Solar Energy. *Journal of Undergraduate Research in Physics*, *27*, 1-2.

Yang, S., Deng, C., Gao, Y., & He, Y. (2016). Diesel particulate filter design simulation: A review. *Advances in Mechanical Engineering*, *8*(3), 1687814016637328. <https://doi.org/10.1177/1687814016637328>

Yin, R., Hu, S., & Yang, Y. (2019). Life cycle inventories of the commonly used materials for lithium-ion batteries in China. *Journal of Cleaner Production*, *227*, 960-971. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.186>

Yue, K. (2012). Comparative Analysis of Scrap Car Recycling Management Policies. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 44-50. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.007>

Zarini, A. (2010). *Alternativas de reutilización y reciclaje de neumáticos en desuso*. <https://ri.itba.edu.ar//handle/123456789/507>

Zhang, G.-S., Li, T.-T., Luo, M., Liu, J.-F., Liu, Z.-R., & Bai, Y.-H. (2008). Air pollution in the microenvironment of parked new cars. *Building and Environment*, 43(3), 315-319. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.019>

Zhang, S., Zhang, Q., & Zhang, Z. C. (2004). Extractive Desulfurization and Denitrogenation of Fuels Using Ionic Liquids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(2), 614-622. <https://doi.org/10.1021/ie030561+>

9- RECURSOS WEB

<https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

<https://www.oica.net/>

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32019R0631>

https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles_en

<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/vehiculos/Como-se-tratan.aspx>

<https://www.eea.europa.eu/>

<https://home.kpmg/es/es/home/industries/automocion.html>

<https://www.acea.auto/publication/aeris-air-quality-report-euro-7-impact-assessment/>

<https://www.race.es/como-son-baterias-coches-electricos>

<https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>

<https://www.cesifo.org/en/publikationen/2021/working-paper/carbon-policy-and-emissions-implications-electric-vehicles>

<https://h2.live/en/wasserstoffautos>

<https://www.toyota.es/coches/mirai/caracteristicas>

<https://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/tablas-estadisticas/2019/>

<https://www.ine.es>

<https://www.ree.es/es>

<https://www.repsol.com/es>

<https://ec.europa.eu/eurostat/>

<https://datosmacro.expansion.com/materias-primas/opec>

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Emisiones de CO ₂ vertidas en distintos sectores. El sector del automóvil transporte representa el segundo sector con mayor tasa de emisión y, dentro de este, los coches y las motos son los que más contaminan la atmosfera (Adaptado a partir de los datos proporcionados por OICA)	2
Figura 2: Variación de las emisiones de CO ₂ registradas en el periodo indicado, de 1995 a 2021. (Adaptado a partir de los datos proporcionados por OICA)	2
Figura 3: Ciclo de vida de un producto (Viñoles et al., 2014)	5
Figura 4: Impacto ambiental generado durante todas las fases del ciclo de vida de un vehículo (Elaboración propia)	6
Figura 5: Esquema del funcionamiento de un motor de cuatro tiempos, con las distintas etapas representadas (Rovira & Muñoz, 2015)	7
Figura 6: Vehículos que llegan al final de su vida útil (ELVs) y en paradero desconocido originados en la UE durante el periodo de años mostrado (Kitazume et al., 2020)	16
Figura 7: Esquema que muestra los caminos que siguen los diferentes desechos de los VFU (Elaboración propia)	20
Figura 8: Uso de energía en diferentes escenarios de reciclaje (Elaborado a partir de datos de Yue, 2012).....	21
Figura 9: Emisiones de contaminantes en diferentes escenarios de reciclaje (Yue, 2012)	21
Figura 10: Variación de la temperatura media del planeta con respecto a los niveles preindustriales (1850). Las emisiones de gases de efecto invernadero ha provocado el aumento de la temperatura en más de un grado desde entonces (Elaboración propia a partir de datos de NASA)	23
Figura 11: Emisiones europeas de SO ₂ , NO _x y NH ₃ en la ventana temporal 1880-2020 (Grennfelt et al., 2020).....	25
Figura 12: Esquema general del funcionamiento del sistema EGR (Lopatin, 2020)	29
Figura 13: Esquema del funcionamiento del EHC (Gao et al., 2019)	31
Figura 14: Configuración de las HCT (J. Lee et al., 2019)	31
Figura 15: Clasificación de ERS (Elaboración propia)	34
Figura 16: Emisiones asociadas a los vehículos y a la producción de energía eléctrica en EEUU (Instituto IFO)	39
Figura 17: Pila de combustible (Tollefson, 2010).....	41
Figura 18: Esquema típico de la pila de combustible y tanque de hidrógeno en un FCV (Manoharan et al., 2019).....	41
Figura 19: Vías generales de obtención de hidrógeno (Kurtz et al., 2019).....	43
Figura 20: Evolución de los costes de los FCVs (Ajanovic & Haas, 2021)	45
Figura 21: Emisiones y consumo energético de gases de efecto invernadero en diferentes tipos de vehículos (Vicens Garcia, 2011).....	47
Figura 22: Peso de los sistemas de almacenamiento de energía en diferentes vehículos para realizar 500 km (Ajanovic & Haas, 2021)	48
Figura 23: Potencial de contaminación de diferentes tecnologías basada en un tiempo de vida de 200.000 km (Rosenfeld et al., 2019)	49
Figura 24: Diagrama del sistema viento-hidrógeno (Khan & Iqbal, 2009).....	52
Figura 25: Conversión de biomasa a hidrógeno basada en la pirólisis (Ni et al., 2006).....	54
Figura 26: Evolución de las emisiones de CO ₂ en vehículos ligeros en Europa (Pasaoglu et al., 2012).....	56
Figura 27: Evolución de las emisiones de SO ₂ en vehículos ligeros en Europa (Takeshita, 2011)	56
Figura 28: Evolución de las emisiones de NO _x en vehículos ligeros en Europa (Takeshita, 2011)	57

Figura 29: Evolución de las emisiones de MP en vehículos ligeros en Europa (Takeshita, 2011)	58
Figura 30: Ventas por mes de vehículos eléctricos enchufables en Europa (O'Neill & De, 2018).....	61
Figura 31: Matriculaciones de vehículos eléctricos en Europa con respecto al total de matriculaciones en el año 2017 (O'Neill & De, 2018).....	61
Figura 32: Unidades vendidas de vehículos de hidrógeno en 2017 (Elaboración propia)	63
Figura 33: Visión de los encuestados sobre la tecnología de hidrógeno (Germán & Navajas, 2015)...	64
Figura 34: Evolución esperada en las ventas de vehículos eléctricos en el Reino Unido (KPMG)	65
Figura 35: Evolución esperada en las ventas de vehículos eléctricos en Europa (IEA).....	66
Figura 36: Evolución de las matriculaciones de vehículos ligeros en Europa (Krause et al., 2020).....	67
Figura 37: Evolución de las matriculaciones de vehículos pesados en Europa (Krause et al., 2020) ...	68
Figura 38: Exceso de demanda de energía del 21 de julio de 2020 (REE).....	70
Figura 39: Exceso de demanda de energía del 22 de diciembre de 2020 (REE)	70

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de los límites de emisiones en vehículos de gasolina en función de las distintas normas EURO (Elaborado a partir de los datos de la normativa europea).....	11
Tabla 2: Comparación de los límites de emisiones en vehículos diésel en función de las distintas normas EURO (Elaborado a partir de los datos de la normativa europea).....	11
Tabla 3: Comparación de las emisiones de los distintos contaminantes principales de un vehículo. Los vehículos diésel presentan un mayor carácter contaminante (Elaboración propia)	14
Tabla 4: Composición de materiales promedio de un vehículo de combustión (Elaborada a partir de datos de Yue, 2012).....	18
Tabla 5: GWP de las sustancias reguladas por el protocolo de Kioto (Galante Marcos, 2011)	24
Tabla 6: Afectaciones de los principales contaminantes a la flora y fauna (Pardos, 2006).....	27
Tabla 7: Reducción en las cantidades de S y N en los distintos combustibles tratados con líquidos iónicos (S. Zhang et al., 2004).....	32
Tabla 8: Tabla resumen de los distintos tipos de baterías usadas en automóviles (Elaborada a partir de RACE).	38
Tabla 9: Comparativa entre EVs y FCVs (Vicens Garcia, 2011)	50
Tabla 10: Comparación entre camiones diésel, de batería y de hidrógeno (D.-Y. Lee et al., 2018).....	51
Tabla 11: Posibles escenarios de la norma EURO 7 en comparación con su predecesora (ACEA).....	55
Tabla 12: Energía proporcionada por los diferentes componentes del modelo de estación (López Cascales et al., 2015)	71
Tabla 13: Especificaciones del Toyota Mirai (Toyota).....	72