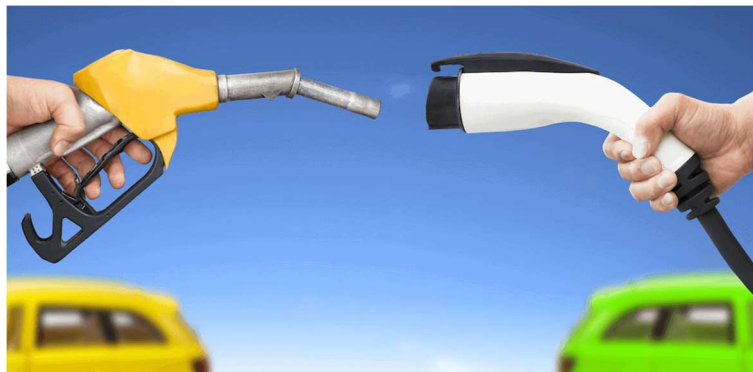


MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA
SOSTENIBLE

TRABAJO FIN DE MASTER

ESTUDIO ENERGÉTICO, ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL DE LOS E-FUELS PARA AUTOMOCIÓN EN COMPARACIÓN CON LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS DE BATERÍAS



Estudiante: Leivar Cilleruelo, Jon

Directora: Rozas Guinea, Saroa

Codirector: Gutiérrez, Ángel María

Curso: 2023-2024

Fecha: Bilbao, 01 marzo, 2024

Abstract

This study provides an energy, economic and environmental assessment of e-fuels for the automotive sector in comparison to battery electric vehicles. Motivated by the growing concern for the decarbonisation transport sector, which makes it necessary to study other light mobility routes away from fossil fuels. Firstly, an analysis of the current situation related to the environmental impact produced by the road transport sector in relation to light-duty vehicles is carried out. In the field of e-fuels, the different fuels produced from CO₂ and N₂ capture are identified, evaluating their energy efficiency, production costs (CAPEX and OPEX) and the environmental impact. Secondly, the different energy storage technologies for battery electric vehicles (BEV) are evaluated, considering their main specifications such as volumetric power densities, gravimetric power densities, life cycles, etc., as well as the associated costs and the environmental impact of their life cycle. All this under the regulatory framework, which plays an essential role. Finally, the keys to each of the technologies evaluated within the aspects considered are given.

Keywords: automotive; sustainability; e-fuels; renewable energies; decarbonization; electric vehicles; environmental assessment; market place

Resumen

En el presente trabajo se lleva a cabo un estudio energético, económico y ambiental de los e-Fuels para automoción en comparación con los vehículos eléctricos de baterías, debido a la creciente necesidad y preocupación por la descarbonización del sector que hace necesario estudiar otras rutas de movilidad ligera que permitan romper con el modelo actual y buscar su sostenibilidad. En primer lugar, se lleva a cabo el análisis de la problemática actual orientada al impacto ambiental producido por el sector del transporte y, en particular, por carretera referido a la automoción ligera. Se identifica posteriormente en el ámbito de los e-fuels los diversos combustibles producidos a partir de la captura de CO₂ y N₂, evaluando sus eficiencias energéticas, costes de producción (CAPEX y OPEX) e impacto ambiental asociado a su producción. En segundo lugar, se lleva a cabo la evaluación de las distintas tecnologías de almacenamiento de energía de los vehículos eléctricos de baterías (BEV), considerando sus principales especificaciones tales como densidades de potencia volumétricas, gravimétricas, ciclos de vida, etc., así como los costes asociados y el impacto ambiental de su ciclo de vida. Todo ello bajo el marco normativo el cual ejerce un papel esencial. Finalmente se dan las claves de cada una de las tecnologías evaluadas dentro de los aspectos considerados.

Palabras clave: automoción; sostenibilidad; e-fuels; energías renovables; descarbonización; vehículos eléctricos; evaluación ambiental; mercado.

Laburpena

Ikerketa honetan e-fuelei buruzko energia, ekonomia eta ingurumen azterketa egin da, deskarbonizazio sektorean dagoen larritasunarengandik eta automozio munduko jasangarritasuna bilatzeko. Lehenik eta behin garraio sektoreak, batez ere errepide bidezko ibilgailu, eragindako ingurumen-inpaktuaren analisia egin da. Ondoren, e-fuelen eremuan, CO₂ eta N₂ harrapaketatik eratorritako hainbat erregai identifikatu dira, haien energia eraginkortasunak, ekoizpen kostuak (CAPEX eta OPEX) eta haien ekoizpenarekin lotutako ingurumen inpaktua ebaluatu dira. Bigarrenik, bateria elektrikoetako ibilgailuen energia biltegitratze teknologia desberdinen ebaluazioa egin da, haien ezaugarri nagusiak kontuan hartuta, hala nola potentzia dentsitate bolumetrikokoak, grabimetrikokoak, bizitza zikloak, etab., izandako kostuak eta haien bizi-zikloaren inpaktua ere. Egindako guztia arau-esparruaren barruan sartu da. Azkenik, ebaluatutako teknologia bakoitzaren gakoak laburbildu dira.

Hitz gakoak: automozioa; jasangarritasuna; e-fuelak; energia berriztagarriak; deskarbonizazioa; ibilgailu elektrikoak; ingurumen-ebaluazioa; merkatua.

Índice

Abstract	I
Resumen	I
Laburpena	II
Índice de Figuras	IV
Índice de Tablas	V
Índice de Ecuaciones	VI
Nomenclatura	VII
Abreviaciones	IX
1. Introducción	1
2. Contexto	6
3. Objetivos Y Alcance Del Trabajo	14
4. Metodología	15
6. Vehículos A E-Fuels	18
7. Vehículos Eléctricos De Baterías	40
8. Conclusiones, Análisis y Discusión	54
9. Bibliografía	59

Índice de Figuras

Figura 1. Tendencias de las emisiones mundiales de GEI del transporte. Adaptado (IPCC, 2020).	3
Figura 2. Emisiones de contaminantes provocadas por diversos modos de transporte. Adaptado (Profillidis et al., 2014).	4
Figura 3. Desarrollo de sistemas de propulsión en términos de ventas de coches nuevos del 2017 al 2030. Adaptado. (PWC, 2018).	9
Figura 4. Cuota de mercado respectiva por tipo de sistema de propulsión electrificado A) mundial y B) Unión Europea. Adaptado (Conway et al., 2021).	10
Figura 5. Emisiones de dióxido de carbono (CO ₂) en los escenarios de ambición actual y alta ambición. Adaptado (IPCC, 2020).	11
Figura 6. Emisiones de CO ₂ en carretera medidas en vehículos diésel y gasolina que abarcan modelos de los años 2012-2019 (A), y mediciones de emisiones de NO _x en carretera de vehículos diésel Euro 3 - Euro 6, (B). Adaptado (Conway et al., 2021).	12
Figura 7. Diagrama de Gantt que representa la planificación temporal y las tareas clave de la investigación sobre alternativas de propulsión en el sector automotriz.	16
Figura 8. Vías de producción, incluidas las materias primas y los combustibles producidos, para las principales opciones de e-fuels (Grahm et al., 2022).	19
Figura 9. Ilustración esquemática de los principales procesos de producción de e-fuels. Adaptado (IEA, 2023).	20
Figura 10. Rutas de producción de e-fuel líquidos (Soler, 2019).	22
Figura 11. Productos de e-fuel líquidos Fischer-Tropsch (Soler, 2019).	22
Figura 12. Recursos necesarios para la producción de e-fuels líquidos (Soler, 2019).	23
Figura 13. Intensidad de GEI (g CO ₂ /km) de diferentes combinaciones de combustibles para vehículos ligeros (Soler, 2019).	24
Figura 16. Diagrama de flujo simplificado del proceso de electrólisis del agua (Schröer, 2021).	24
Figura 17. Diagrama de bloques del proceso de obtención de bio-efuels. Adaptado (Grahm et al., 2022).	31
Figura 18. Costes de producción para e-metanol e hidrógeno electrolítico licuado mostrando los diferentes costos de componentes, utilizando valores base a largo plazo, 20 – 30 años. Adaptado (Grahm et al., 2022).	36
Figura 19. Ciclo de vida de la producción de e-fuels.	37
Figura 20. Emisiones de GEI relacionadas con la producción de e-fuels en función de la fuente energética empleada. Adaptado (IEA, 2023).	37
Figura 21. Esquema de tratamiento de VFVU (MITECO, s.f.).	39
Figura 22. Configuración típica del sistema de propulsión de BEV (Yong et al., 2015).	40
Figura 23. Representación visual de las densidades de energía volumétrica y gravimétrica de distintos tipos de tecnologías de baterías. Adaptado: (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024)	44
Figura 24. Evolución de la densidad energética de las baterías desde 2010 hasta 2020, según BNEF. Adaptado (Ricardo, 2023).	44
Figura 25. Nuevas matriculaciones de coches eléctricos en la UE (Ricardo, 2023).	46
Figura 26. Rango medio y mediano de la autonomía (en millas) de los vehículos eléctricos de batería (BEVs) disponibles en EE. UU. de 2013 a 2020 (Conway et al., 2021).	46

Figura 27. Evolución del precio de la fabricación de baterías en €/kWh (Sanz, 2015).	48
Figura 28. Impacto de GEI de los vehículos eléctricos de baterías (BEV) frente a los vehículos de combustión interna de gasolina (ICEV-G) y diésel (ICEV-D) (Ricardo, 2023).....	52
Figura 14. Diversas formas de almacenar e-fuels. (Soler, 2019).	55
Figura 29. Eficiencias de los diferentes procesos de conversión de energía (Martin, 2023).	55
Figura 30. Evolución del precio de las baterías a lo largo del tiempo (Conway et al., 2021).	57
Figura 31. Evolución de los e-fuels líquidos expresados en (€/L y €/kWh) (Soler, 2019).....	58
Figura 31. Diferentes alternativas frente a diferentes parámetros clave (Soler, 2019).....	58

Índice de Tablas

Tabla 1. Consumo de crudo y productos petrolíferos por sectores económicos en España en 2021. Fuente: CORES (entidad española responsable de mantenimiento de las existencias estratégicas de productos petrolíferos y del control de las existencias de la industria de productos petrolíferos y gas natural).	1
Tabla 2. Objetivos de Desarrollo 2030 para la descarbonización del sector del transporte. (OECD, 2023) ...	11
Tabla 3. Diversos usos de los e-fuels (Soler, 2019).....	21
Tabla 4. Panorama cualitativo de los e-fuels (Soler, 2019).	21
Tabla 5. Comparativa de las tecnologías alcalina, PEM y óxido sólido (Albistur, 2022).	25
Tabla 6. Costes e inversión de la electrólisis a corto plazo (5 – 10 años) y a largo plazo (20 – 30 años) en base a la eficiencia (Buttler & Spliethoff, 2018) (Grah et al., 2022).	27
Tabla 7. Resumen de los distintos tipos de hidrógeno y sus características (Reddy et al., 2023).	28
Tabla 8. Costes de producción de carbono y nitrógeno en €/tCO ₂ o €/tN ₂ calculados a partir del CAPEX (de vida útil de 20 a 30 años) y un OPEX del 2 al 5 % del CAPEX. No incluye el coste de la electricidad (Albrecht & Nguyen, 2019) (Daggash et al., 2018).....	29
Tabla 9. Costes de síntesis de e-fuels (€/kW combustible) expresado en términos de CAPEX a corto plazo (5 - 10 años) y a largo plazo (20 - 30 años). Donde el CAPEX por kW de combustible es función del tamaño de la instalación; los valores a corto plazo reflejan plantas de pequeña escala, por debajo de 50 MW y, a largo plazo reflejan plantas de mayor capacidad (Grah et al., 2022).....	32
Tabla 10. Costes de almacenamiento (€/kWh) de H ₂ a corto plazo (5 - 10 años) y a largo plazo (20 - 30 años) (Albrecht & Nguyen, 2019) (Grah et al., 2022) (Albrecht & Nguyen, 2019).....	33
Tabla 11. Costes armonizados (€/kWh) a corto plazo (5 – 10 años) y a largo plazo (20 - 30 años) de cada una de las etapas involucradas de los e-fuels.	34
Tabla 12. Comparativa de las características de distintos tipos de almacenamiento de energía.....	41
Tabla 13. Resumen de las características de varios tipos comunes de baterías.	42
Tabla 14. Comparación de las características y especificaciones de diversas tecnologías de baterías.	43
Tabla 15. Precio de las baterías en escenario medio (Sanz, 2015).....	48
Tabla 16. Ayudas referentes al programa MOVES III.	53

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Reacción de metanación a partir de CO.....	30
Ecuación 2. Reacción de metanación a partir de CO ₂	30
Ecuación 3. Reacción de síntesis de metanol a partir de CO.....	30
Ecuación 4. Reacción de síntesis de metanol a partir de CO ₂	30
Ecuación 5. Reacción genérica de síntesis F-T.....	31
Ecuación 6. Reacción Haber-Bosch.....	31

Nomenclatura

CH₃OH Metanol

CH₄ Metano

C_nH_{2n+2} Alcanos

CO Monóxido de carbono

CO₂ Dióxido de carbono

Cr Cromo

Fe Hierro

H⁺ Ion hidrógeno (o protón)

H₂ Hidrógeno

H₂O₂ Peróxido de hidrógeno

H₂SO₄ Ácido sulfúrico

IrO₂ Óxido de iridio

KOH Hidróxido de potasio

La Lantano

MgO Óxido de magnesio

Mn Manganeso

N₂ Nitrógeno

NaOH Hidróxido de sodio

NH₃ Amoníaco

Ni Níquel

NIMH Níquel metal-hidruro

NIOOH Hidróxido de óxido de níquel

NO_x Óxidos de nitrógeno

OH⁻ Ion hidroxilo

PbO₂ Dióxido de plomo

Pt	Platino
RuO ₂	Dióxido de rutenio
SO ₂	Dióxido de azufre
Ti	Titanio
Y ₂ O ₃	Óxido de itrio
ZrO ₂	Dióxido de zirconio

Abreviaciones

AEL	Alkaline electrolyzers o electrolizadores alcalinos
AEM	Anion exchange membrane o membrana de intercambio aniónico
AIE	Agencia Internacional de la Energía
BEV	Battery electric vehicle o vehículo eléctrico de batería
CAPEX	Capital expenditures o Inversión en bienes de capital
CCUS	Carbon Capture use and storage o captura, uso y almacenamiento de carbono
CORES	Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos
DAES	Departamento de asuntos económicos y sociales
E-Fuel	Electrofuel o Electrocombustible
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle o Vehículo eléctrico de pila de combustible
FC	Factor de capacidad
FT	Fischer-Tropsch
GEI	Gases de efecto invernadero
GLP	Gas licuado del petróleo
GNC	Gas natural comprimido
HC	Hidrocarburos
HEV	Vehículos eléctricos híbridos
ICE	Internal combustion engine o vehículo de combustión interna
KWh	Kilovatios hora
MWh	Megavatios hora
OPEX	Operational expenditures o Gasto en operaciones
PCI	Poder calorífico inferior
PEM	Proton-exchange membrane fuel cell o pila de combustible de membrana de intercambio protónico
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle o vehículo eléctrico híbrido enchufable
PtE	Power to e-fuels

PtL	Power to liquid
SOEL	Solid oxide electrolytic cell o celda electrolítica de óxido sólido
TtW	Tank to wheel o de tanque a rueda
TWh	Teravattios hora
UE	Unión Europea
VOC	Compuestos orgánicos volátiles
WtT	Weel to tank o de pozo a tanque
WtW	Weel to Wheel o de pozo a rueda

1. Introducción

El transporte es crucial para los tres pilares del desarrollo sostenible: la economía, el medio ambiente y la sociedad. El transporte facilita el acceso a las oportunidades, los servicios y la vida social ya que permite la circulación de bienes y personas. Por lo tanto, es un sector importante de la economía mundial, proporcionando acceso a oportunidades que contribuyen al bienestar económico y social de los países y sus habitantes. Sin embargo, el transporte se enfrenta a un reto clave: el cómo satisfacer la creciente demanda reduciendo al mismo tiempo la contaminación y las emisiones de GEI.

El transporte es el sector más dependiente de los combustibles fósiles (OECD, 2023). La descarbonización del sector del transporte, que se refiere al proceso de reducir o eliminar las emisiones de carbono asociadas al transporte, requerirá una transición energética de la flota de vehículos que se aleje de los combustibles fósiles.

Se calcula que la transición de vehículos de cero emisiones ha evitado en 2022 casi 1,7 millones de barriles de petróleo al día (OECD, 2023), debido a que el transporte supone el sector económico de mayor consumo de crudo (ver Tabla 1). La planificación de sistemas de transporte con bajas emisiones de carbono que se aparten de las tecnologías que emiten contaminantes nocivos ayuda a garantizar la habitabilidad de las ciudades a medida que aumenta la población urbana.

Tabla 1. Consumo de crudo y productos petrolíferos por sectores económicos en España en 2021. Fuente: CORES (entidad española responsable de mantenimiento de las existencias estratégicas de productos petrolíferos y del control de las existencias de la industria de productos petrolíferos y gas natural).

Sector económico	Consumo, %
Transporte (61,6 % gasóleo, 10% gasolina, 5,7 % queroseno) *	63
Industria (consumo de productos en apoyo a sus actividades)	18,5
Pesca, Residencial, Servicios comerciales y públicos y Agricultura y Silvicultura	13,5
Transformación energética – eléctrica (transformar un combustible primario en un producto energético secundario, incluyendo, entre otros, la producción de electricidad, cogeneración, fabricación de gas y petroquímica)	5
Energía (consumos de las empresas energéticas para actividades extractivas (minería, petróleo y gas), funcionamiento de actividades de operación de las plantas de transformación, el consumo en altos hornos no dedicado a transformación)	0,005

*No incluye el consumo en navegación marítima internacional tanto de gasóleos como de fuelóleos.

A su vez, el agotamiento de los recursos petrolíferos es un asunto de preocupación, dado que se prevé que las reservas mundiales de petróleo sean finitas y sostenibles durante un tiempo limitado con la tecnología actual.

Dado que el transporte es uno de los principales consumidores de petróleo, reducir la dependencia de los combustibles fósiles es crucial para garantizar la seguridad y la sostenibilidad energética. Para ello, es necesario diversificar las fuentes de energía para el transporte como el cambio hacia las energías renovables, los biocombustibles y el hidrógeno, así como mejorar la eficiencia energética en el transporte (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024). La seguridad energética es una consideración crítica, ya que muchas regiones, incluida Europa, dependen en gran medida de fuentes extranjeras para su abastecimiento de petróleo, lo que puede crear vulnerabilidades geopolíticas y económicas. Reducir la dependencia de los combustibles fósiles para el

transporte es crucial para mejorar la seguridad energética a través de la diversificación de las fuentes de energía.

Las Naciones Unidas definen el desarrollo sostenible como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. Esta definición pone en duda que el sector transporte sea actualmente catalogado como sostenible, debido a que este sector representa el 23 % de las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía (OECD, 2023), además de que éste también contribuye indirectamente a aumentar la demanda de energía, debido a la construcción de infraestructuras de transporte, la fabricación de vehículos y la producción de combustibles emisores de gases de efecto invernadero. Por ello, lo convierte en un campo crucial para la descarbonización. A su vez, la evolución de la población, el crecimiento económico y el uso del suelo influyen en la actividad del transporte.

Hasta el momento, dentro del sistema socioeconómico que rigen los modelos productivos se ha premiado el crecimiento económico sobre aspectos medioambientales, por ejemplo, el aumento del producto interior bruto (PIB) representa una tendencia positiva independientemente de su impacto sobre las emisiones. Sin embargo, este hecho se está moderando debido a las recientes legislaciones que establecen criterios referentes a la contaminación, aunque estos, impacten sobre el crecimiento económico y el desarrollo productivo. Hechos tales como el aumento de la población y el crecimiento económico mundial ejercerán una mayor presión sobre la política de transportes para hacer frente a los consiguientes aumentos de su demanda. La evolución de estos factores influirá sin duda en la planificación del transporte. Por ello, los gobiernos deben afrontar el doble reto de satisfacer el aumento de la demanda y cumplir los objetivos de reducción de emisiones del sector del transporte.

El Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DAES) de la ONU prevé que la población mundial alcanzará los 9.700 millones en 2050 y los 10.400 millones en 2100. Este aumento se verá impulsado por el descenso de las tasas de mortalidad, la estructura relativamente joven de la población global actual y el mantenimiento de las tasas de natalidad mundiales. El rápido aumento de la población implica la necesidad de incrementar los desplazamientos y, por tanto, este aumento de la demanda de viajes se deberá satisfacer de forma equitativa y respetuosa con el medio ambiente. La ONU prevé que en 2050 el 68 % de la población mundial vivirá en ciudades (OECD, 2023). La urbanización también puede conducir a la expansión urbana, lo que repercute en un mayor uso del suelo y una mayor dependencia del automóvil. A medida que aumenta la urbanización, también aumenta el número de ciudades más pobladas. En 2018, había 33 ciudades en todo el mundo con más de 10 millones de habitantes (denominadas megaciudades). En 2030 habrá 43 megaciudades, principalmente en territorios en vías de desarrollo (OECD, 2023). Este hecho presionará a los responsables políticos para que garanticen la integración de las políticas de transporte y ordenación del territorio que mejoren el acceso al transporte sostenible en las ciudades y sus alrededores. Por ello, en las próximas tres décadas, la distribución de la población de los territorios del mundo cambiará significativamente, lo que repercutirá aún más en el tipo y la distribución de la demanda de transporte.

Dado que el transporte es un factor clave de la economía mundial, éste, ejerce un gran impacto ambiental. En términos de datos, el sector transporte es el sector de mayor impacto ambiental a nivel europeo y estatal, aportando un 30 y 40 % de las emisiones globales, respectivamente. En cuanto a nivel mundial, es el tercer sector de mayor impacto con un 27 % de las emisiones globales. El transporte por carretera aporta el 80,6 % de las emisiones globales del transporte, situándose a la cabeza. El transporte aéreo y marítimo aportan el

13,3 % y 3,7 % de las emisiones globales del transporte, respectivamente. En último lugar se encuentra el ferroviario, con un 2,4 % (Kazancoglu et al., 2021).

En la siguiente Figura 1 se muestra la tendencia de las emisiones globales de GEI del sector transporte. En ella se observa que las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte han aumentado significativamente durante las últimas dos décadas, y desde 2010, las tendencias del sector han aumentado más rápido que para cualquier otro sector de uso final, promediando un crecimiento anual de +1,9 % desde el año 2000. El transporte es un sector fundamental en las estrategias de mitigación de GEI en muchos países, ya que representa el sector de mayor consumo de energía en el 40 % de los países de todo el mundo, y en la mayoría de los países restantes, el transporte es el segundo sector de mayor consumo de energía (Hasan et al., 2019).

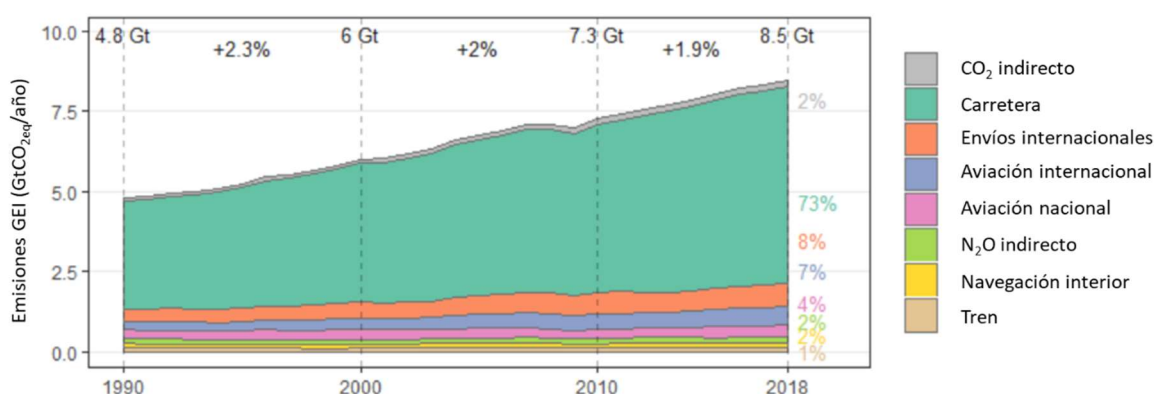


Figura 1. Tendencias de las emisiones mundiales de GEI del transporte. Adaptado (IPCC, 2020).

Los retos actuales están relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación atmosférica, la disminución de las reservas de petróleo y la seguridad energética. La descarbonización del sector del transporte representa un cambio significativo respecto a su actual desempeño ofreciendo oportunidades para reconsiderar los beneficios más amplios de un aire más limpio, una menor dependencia del petróleo y unas ciudades más habitables.

Lograr la transición hacia sistemas de transporte más ecológicos, limpios y robustos debe incluir servicios asequibles, seguros e integradores. Las emisiones del tubo de escape del transporte fueron responsables de cerca de 385.000 muertes prematuras en 2015 (OECD, 2023). Esto es debido a que el transporte es un importante emisor de contaminación del aire, representando el 90 – 95 % de las emisiones de monóxido de carbono (CO), el 60 - 70 % de óxidos de nitrógeno (NO_x), el 40 - 50 % de hidrocarburos (HC) y compuestos orgánicos volátiles (VOC), el 30 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), el 5 % de dióxido de azufre (SO₂) y el 25 % de partículas en suspensión (OECD, 2023). En la siguiente Figura 2, se muestra las emisiones de algunos contaminantes del aire provocadas por los diversos modos de transporte para el transporte de pasajeros y de carga.

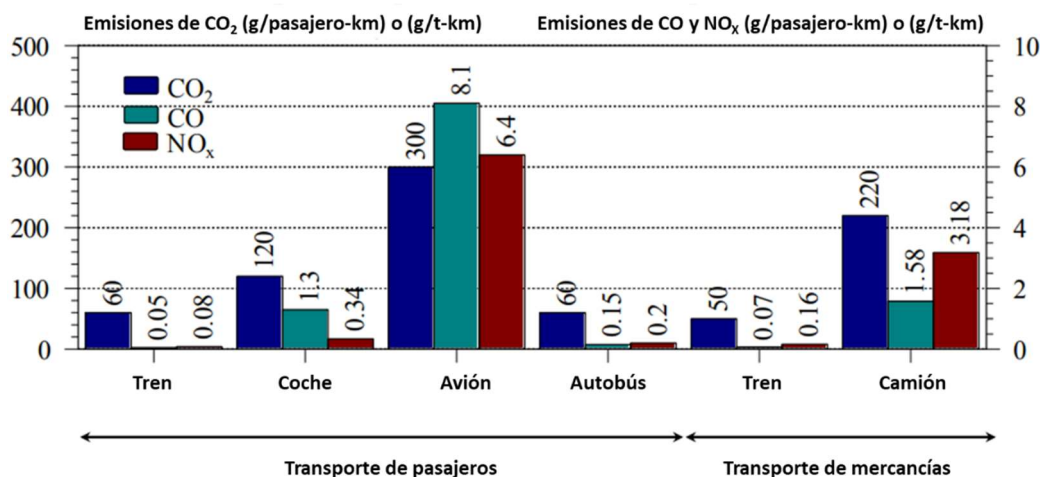


Figura 2. Emisiones de contaminantes provocadas por diversos modos de transporte. Adaptado (Profillidis et al., 2014).

Los vehículos de pasajeros contribuyen aproximadamente al 75 % de las emisiones de CO₂ del transporte de pasajeros, mientras que el transporte público (autobuses y ferrocarriles) genera alrededor del 7 % de las emisiones de CO₂ del transporte de pasajeros a pesar de cubrir una quinta parte del transporte de pasajeros a nivel mundial. Las evidencias disponibles sugieren que las emisiones de CO₂ del transporte necesitarían restringirse alrededor de un 70 a 80 % por debajo de los niveles de 2015, para cumplir con los objetivos establecidos en el Acuerdo de París.

La mitigación del sector vial, tanto de pasajeros como de carga, ofrece la mayor magnitud de potencial de reducción. Este enfoque incluye, por ejemplo, en relación con el transporte de pasajeros, la implementación de políticas que reduzcan la necesidad de viajes de transporte, evitando así viajes motorizados innecesarios mediante la promoción de servicios alternativos que eliminen la necesidad de viajar. Estas estrategias pueden involucrar desde la movilidad compartida, inclusión y mejoras del transporte público en términos de recorridos, frecuencias, coste, etc. En definitiva, modelos enfocados a la sostenibilidad del sector.

Un enfoque aborda el movimiento hacia modos sostenibles, como el transporte mediante medios activos como el caminar, la bicicleta, etc., así como el uso de transporte público y otras alternativas como los servicios de movilidad colaborativa. No obstante, estas estrategias son viables en zonas urbanas y actualmente de uso limitado, siendo más complejas su implementación en entorno interurbanos y de largas distancias. Por ello, deben combinarse con otras estrategias tales como tecnologías de vehículos y combustibles menos intensivos en carbono. Sin embargo, dado que este cambio de paradigma implica cuestiones difíciles de abordar, se establece la necesidad de mejorar las opciones dentro del actual sistema de transporte, como son la implementación de tecnologías que reduzcan el impacto medioambiental, como los vehículos eléctricos, los cuales producen cero emisiones durante su uso y vehículos propulsados con e-fuels, en los cuales la generación de GEI durante su uso es compensada, resultando en un balance neto nulo.

Aunque la descarbonización del sector del transporte es una prioridad internacional, en muchos países es solo una de las muchas prioridades de los gobiernos que quieren mejorar sus economías y calidad de vida de sus ciudadanos (OECD, 2023). Para muchos países en vías de desarrollo, la reducción de las emisiones del transporte debe considerarse en el contexto de otras prioridades estratégicas como, por ejemplo, la mejora de la seguridad vial, la mejora de las redes de carreteras y la provisión de transporte público e infraestructuras

básicas de transporte. Las medidas de transporte con bajas emisiones de carbono tienen muchos beneficios colaterales potenciales. Y, lo que es más importante, pueden contribuir a alcanzar otros objetivos económicos y sociales, como la mejora de la equidad y la accesibilidad, la mejora de la salud y la seguridad, la reducción de la contaminación atmosférica y acústica y la disminución de la congestión, al tiempo que aceleran la transición ecológica del sector. Los responsables políticos deben tratar de maximizar las oportunidades que cumplan los objetivos generales del sector del transporte al tiempo que se avanza hacia un futuro con bajas emisiones de carbono.

A su vez, la dependencia de los combustibles fósiles para el transporte tiene implicaciones geopolíticas y económicas, ya que crea dependencia de los países productores de petróleo y expone a las economías a la volatilidad de los precios del petróleo. La descarbonización del transporte puede reducir estas vulnerabilidades y promover la independencia energética diversificando las fuentes de energía y utilizando energías renovables (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024).

Si no se toman medidas decisivas, el sector del transporte seguirá contribuyendo significativamente a las emisiones mundiales de GEI (principalmente CO₂). La necesidad de romper el vínculo entre emisiones y actividades de transporte es cada vez más urgente. Lograr la descarbonización del sector del transporte exigirá una mayor ambición política y colaboración internación. Y las soluciones varían para tipos específicos de transporte, así como contextos económicos y geográficos. Por ello, en el presente trabajo, se pretende abordar las soluciones tecnológicas disponibles aplicadas al sector de la automoción (transporte por carretera) de manera global sin adentrarse dentro de las distinciones geográficas y los contextos económicos cambiantes.

2. Contexto

La demanda de transporte de personas, combinada con una fuerte dependencia de hidrocarburos líquidos como la gasolina y el gasóleo, ha desempeñado un papel importante en la emisión de gases de efecto invernadero y el aumento de la contaminación atmosférica. Esto, plantea importantes retos para reducir las emisiones en este sector. La búsqueda de combustibles alternativos ha sido un empeño persistente desde la década de 1970, incentivado inicialmente por la preocupación que suscitaban las interrupciones del suministro de petróleo y el deterioro de la calidad del aire urbano. Sumado a los retos mundiales actuales, como la fluctuación de los precios del petróleo, los temores sobre la estabilidad del suministro y las consecuencias de largo alcance del cambio climático han impulsado en mayor énfasis en la identificación de alternativas viables a los combustibles convencionales.

Existen diversas vías como posibles soluciones para reducir las emisiones procedentes del sector del transporte. Entre los más destacados se encuentran los biocombustibles, la energía eléctrica, el hidrógeno, el gas natural, e-fuels y combustibles renovables. A continuación, se indican y describen las tecnologías de propulsión existentes de vehículos agrupándose en 6 categorías principales:

- Vehículos de motores de combustión interna (ICEV). Son aquellos que utilizan la energía química contenida en los combustibles fósiles y transforman el calor en energía mecánica a través de la combustión. Estos vehículos presentan una eficiencia global de en torno al 25 %, lo que se traduce en que, de la energía del combustible introducido, solamente se obtiene en forma de energía mecánica este porcentaje, mientras que el 75 % restante de la energía es desaprovechada. Dentro de este tipo de tecnología de propulsión, se distinguen los motores de explosión de gasolina y los de compresión diésel, predominando estos últimos en el mercado europeo. Durante la combustión de estos combustibles se producen los gases contaminantes como principalmente, el CO₂, además de otros productos como CO, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno, etc. Gracias a las mejoras tecnológicas se ha contribuido favorablemente a reducir las emisiones de gases nocivos, aunque las perspectivas de un mayor grado de optimización son limitadas.
- Vehículos eléctricos híbridos (HEV). Son aquellos que combinan un motor de combustión y otro eléctrico. Este último posee poca potencia siendo su ventaja principal el uso en vías urbanas ya que las baterías tan solo le proporcionan una autonomía de pocos kilómetros. Existen de varias clases; algunos de ellos recuperan energía aprovechando la frenada (para recargar la batería), mientras que otros modelos recargan la batería a partir del motor de combustión (los llamados "Range Extender"). Por último, lo más frecuente es que su batería sea recargable de manera externa. Son conocidos como "Híbridos enchufables" (PHEV) y en ellos el motor principal de tracción es el eléctrico mientras que el de combustión se usa para recargar en parte la batería. Los vehículos con dos motores reducen el consumo de combustible, con lo que se reducen las emisiones contaminantes y se incrementa la eficiencia energética. Por contra, dado que duplican el motor de propulsión, aumentan el precio, así como los costes de mantenimiento y reparación.
- Vehículos eléctricos de batería (BEV). Estos vehículos se basan en obtener la energía para su funcionamiento de la electricidad suministrada por una batería que se recarga de manera externa. Este tipo de tecnología es la más eficiente, además no es una fuente emisora de GEI durante su uso. Sin embargo, su sostenibilidad es altamente dependiente del origen de la energía con la que

son recargadas sus baterías, entre otros. Este tipo de tecnología es la que se evaluará en el presente trabajo.

- Vehículos de celda de combustible (FCEV). Son vehículos eléctricos que generan electricidad mediante una pila de combustible de hidrógeno en lugar de almacenarla en baterías. Los FCEV combinan hidrógeno y oxígeno del aire para producir electricidad, alimentando el motor eléctrico. Este proceso emite vapor de agua y calor como subproductos. Estos vehículos se caracterizan por tiempos de recarga rápidos y una mayor autonomía comparada con los BEV, lo que los hace atractivos, sin embargo, requiere de una infraestructura de recarga de hidrógeno. Además, alguna de las principales limitaciones y desafíos son la durabilidad de la pila de combustible, su autonomía, coste, infraestructura y, la producción sostenible del hidrógeno.
- Vehículos de combustibles alternativos. Dentro de esta categoría se incluyen los vehículos GNC y GLP, por sus siglas de gas natural comprimido o gas licuado de petróleo, respectivamente. Los vehículos GNC, emplean metano almacenado a alta presión como combustible, mientras que los vehículos de GLP emplean una mezcla de propano y butano. Estos combustibles alternativos poseen las ventajas de menores emisiones contaminantes y costes de combustible con respecto a los vehículos ICEV, sin embargo, se enfrentan a menores autonomías, menor red de infraestructuras para su repostaje, así como menores espacios de carga dado el espacio requerido para los depósitos de almacenaje. Además, existen vehículos que emplean combustibles renovables derivado de fuentes biológicas como aceites vegetales, grasas animales o grasas recicladas, compuesto por ésteres de ácidos grasos de cadena larga. Este combustible se denomina biodiesel y se produce típicamente a partir de grasas mediante procesos como la transesterificación, que convierte los aceites y grasas en biodiesel y glicerina, un subproducto con aplicaciones comerciales. El biodiésel puede mezclarse con diésel convencional en diversas proporciones o usarse en su forma pura en motores diésel modificados.
- Vehículos propulsados por e-Fuels. Estos vehículos son propulsados por combustibles producidos a partir de fuentes de energía renovable y empleando carbono o nitrógeno y agua. El carbono o nitrógeno empleado para la síntesis de estos combustibles, no se obtiene de reservas naturales, sino que se extrae de sus fuentes emisoras o del aire. Estos combustibles ofrecen una alternativa sostenible a los combustibles fósiles, dado que, aunque emite GEI durante su uso, es compensada debido a la retirada del CO₂ del medio y el uso de energía renovable para la producción de los combustibles, resultando en un balance neto nulo de emisiones y, además, pueden utilizarse en infraestructuras y motores ya existentes de ICEV. Esta tecnología de propulsión es estudiada en el presente documento.

Tal y como se ha indicado previamente, la necesidad de búsqueda de combustibles o tecnologías de propulsión alternativas a los de origen fósiles, viene determinada, por el impacto ambiental que estos generan durante todo su ciclo de vida, más que por el agotamiento de los recursos. Dado que teniendo en cuenta el consumo actual, se estima que las reservas de crudo existentes son de más de 50 años. Además, sumado a ellas, se encuentran los recursos totales, los cuales incluyen las reservas existentes más las que se estima que aún quedan por descubrir. Por ello, la disponibilidad de los combustibles fósiles no presenta un problema inmediato (Fuente: Energy Information Administration).

Como alternativa actualmente disponible de bajas emisiones fuera de la electrificación, se encuentran los biocombustibles. Estos pueden reducir las emisiones en el sector transporte. Sin embargo, la disponibilidad de materias primas sostenibles limitará el suministro a partir de las tecnologías actuales. Además, este tipo de combustibles poseen ciertos inconvenientes en materia de sostenibilidad, dado que las materias primas con las que se fabrican compiten con los recursos de tierras para la producción de alimentos y piensos. En el año 2022, la producción de biocarburantes ha representado casi el 4 % del transporte mundial por carretera. Alrededor del 90 % de estos combustibles se producen a partir de caña de azúcar, maíz, y otros tipos de aceites como de soja de colza o de palma. El 10 % restante, a partir de residuos como el aceite de cocina usado y las grasas animales. Otras materias primas orgánicas, como los residuos agrícolas y forestales, así como los residuos sólidos urbanos, ofrecen un potencial de suministro adicional, pero en la actualidad no se están utilizando a gran escala y compiten con otros usos bioenergéticos. Se necesitarán inversiones considerables en estas tecnologías y cadenas de suministro para comercializarlas y desplegarlas a gran escala. Aunque el gasto en estas tecnologías se está acelerando en todo el mundo, incluidos los proyectos a escala comercial, la producción total prevista sigue siendo pequeña. A nivel mundial, se prevé que los biocarburantes que pretenden utilizar materias primas y residuos agrarios contribuyan para el año 2030, con un 4 % de la producción mundial de biocarburantes. Además, hay competencia por otras materias primas orgánicas para la producción de biogás, como la bioenergía sólida para aplicaciones de calor y electricidad, por lo que los biocombustibles líquidos sólo obtendrían una parte de este potencial (OECD, 2023).

Con cerca de 1.000 millones de coches en uso en todo el mundo (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024) cabe destacar que los vehículos de motores de combustión interna (ICEV) son los predominantes en la actualidad, dado que los combustibles fósiles son actualmente las fuentes de energía a bordo más convenientes para los vehículos en términos de densidad energética y tiempo de repostaje (Conway et al., 2021), además de que existe una infraestructura global de red de suministro y repostaje que ha ido evolucionando significativamente desde el siglo XIX coincidiendo con el auge de la industria automotriz.

En la siguiente Figura 3, se muestra el desarrollo de los sistemas de propulsión de la venta de vehículos nuevos del año 2017 al 2030, en ella, se muestra el notable crecimiento de los vehículos híbridos y eléctricos en detrimento de los actuales de combustión interna (gasolina y diésel). Resultando en que más del 95 % de las ventas de coches nuevos se espera que estén parcialmente electrificados en 2030 (PWC, 2018). Del 95 % de los coches nuevos que se matriculen en 2030, se estima que el 55 % serán eléctricos y el 40 % híbridos. Sin embargo, todavía una mayoría del stock de vehículos, en torno al 80 % seguirá siendo de combustión, aunque irá desapareciendo progresivamente.

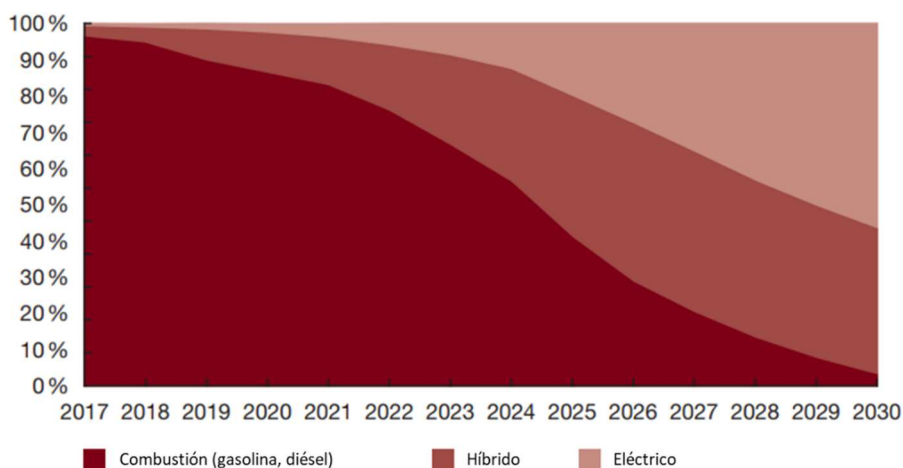


Figura 3. Desarrollo de sistemas de propulsión en términos de ventas de coches nuevos del 2017 al 2030. Adaptado. (PWC, 2018).

Respecto a la tendencia del mercado del automóvil, dado el aumento de la población y la mayor demanda de servicios de movilidad se estima que provoque un aumento de los kilómetros recorridos por persona y año. Ocasionando que en el año 2030 crecerá en todas las geografías: Europa + 23 %, EEUU + 24 % y China + 183 % (PWC, 2018).

Los futuros coches, especialmente aquellos autónomos y compartidos, además, serán utilizados de forma mucho más intensiva que los que conducimos hoy en día. El número de kilómetros al año en coche crecerá radicalmente. En Europa se estima que se pase de 3,7 a 4,2 billones de kilómetros en 2030 y, como consecuencia, necesitarán ser sustituidos con mucha mayor frecuencia (PWC, 2018).

Con referencia a la cuota de mercado mundial por tipo de motor eléctrico, a pesar de la disminución de las ventas de vehículos, desde el año 2015 se ha producido un incremento sustancial principalmente en los vehículos eléctricos de baterías (BEV), en torno a un 2,5 %, seguido de los vehículos híbridos (HEV), con un 1,4 % aproximadamente y, finalmente, los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) con un incremento del 1 %, tal y como se muestra en la siguiente Figura 4 A). Con respecto al mercado de la UE, en la Figura 4 B), se muestra el incremento notable principalmente producido desde el año 2019, incentivado por las ayudas económicas que proporcionan la mayoría de los países de la UE que incluyen subvenciones directas para reducir el precio de compra, exenciones o reducciones de impuestos, así como otros beneficios como estacionamiento gratuito o acceso a carriles exclusivos. Además, influenciado por la creciente preocupación de los habitantes en términos de conciencia medioambiental, así como la cada vez mayor incertidumbre en la adquisición de nuevos vehículos debido a las nuevas legislaciones las cuales afectan a los actuales vehículos de combustión. Entre ellas, el parlamento europeo aprobó en febrero del 2023 el acuerdo alcanzado por los países miembros de la UE en 2022 por el cual se establece la prohibición de la venta de nuevos vehículos de gasolina y diésel a partir de 2035 el objetivo de neutralidad climática para 2050 en consonancia con el Pacto Verde Europeo.

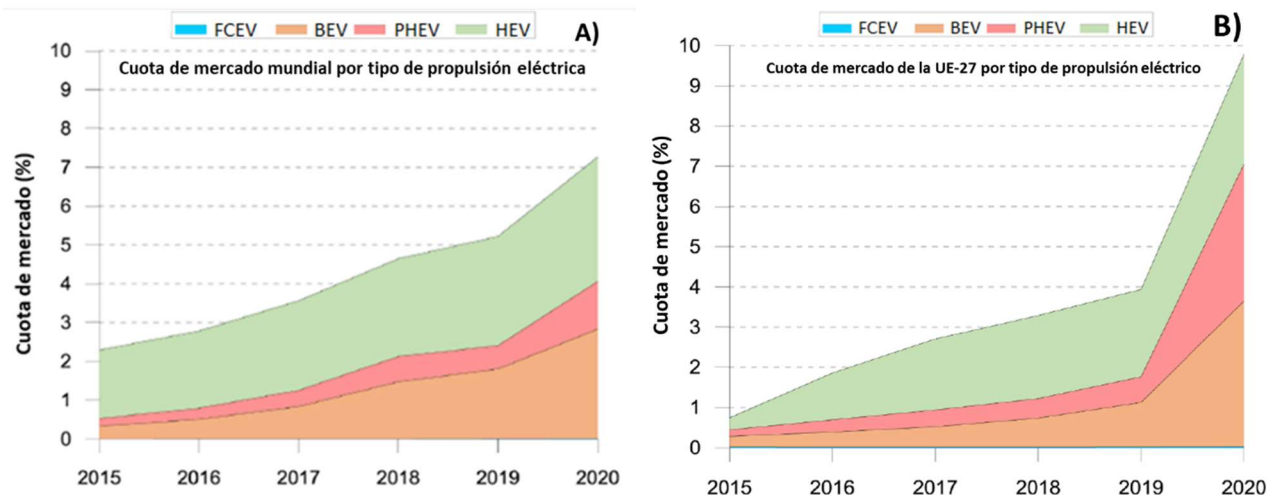


Figura 4. Cuota de mercado respectiva por tipo de sistema de propulsión electrificado A) mundial y B) Unión Europea. Adaptado (Conway et al., 2021).

Se han establecido a lo largo de los años diversos pactos entre gobiernos del mundo en aras de preservar el medioambiente para la reducción de los gases de efecto invernadero. Entre ellos, destaca el Acuerdo de París (en el año 2015), un tratado jurídicamente vinculante para combatir las emisiones de gases de efecto invernadero, en la cual los países acuerdan el objetivo de limitar el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2 grados Celsius (°C) en comparación con los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1,5 °C.

Para lograr este objetivo a largo plazo, los países pretenden alcanzar un máximo mundial de emisiones lo antes posible para lograr una neutralidad climática a mediados de siglo. El acuerdo también reconoce que no todas las regiones pueden descarbonizarse al mismo ritmo, y cita como principios rectores “la equidad y las responsabilidades comunes pero diferenciadas así como las capacidades respectivas, a la luz de las diferentes circunstancias nacionales” (IPCC, 2020).

Aun basándose en los compromisos adquiridos hasta la fecha, las emisiones del transporte mundial no se reducirán lo suficientemente rápido como para cumplir los objetivos del Acuerdo de París. De hecho, si se sigue por este camino se producirá un aumento continuo de las emisiones de CO₂ del sector del transporte de depósito a rueda durante la década de 2020 (TtW, por sus siglas en inglés, las cuales hacen referencia a las emisiones de GEI y otros contaminantes que se emiten durante su uso, es decir, no incluye las emisiones del pozo al depósito, que forman parte de la vía de emisión total) que culminará con un ligero descenso (del 3 %) en 2050 (ver Figura 5). Para limitar el aumento de la temperatura media mundial a 1,5 °C es necesario reducir las emisiones totales del transporte a 2-3 gigatoneladas de aquí a 2050 (IPCC, 2020).

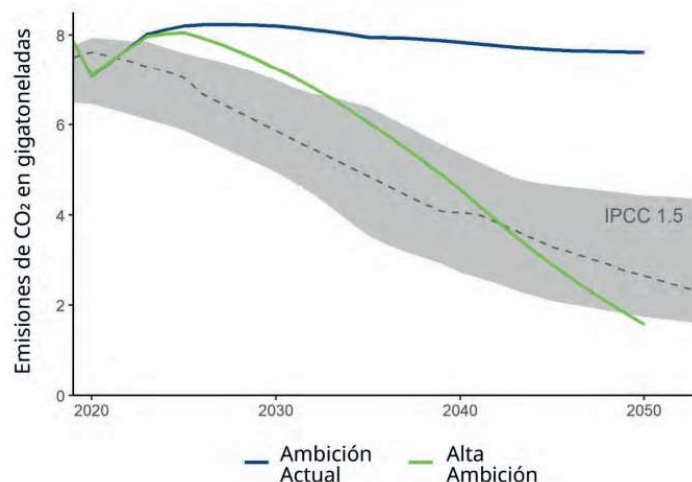


Figura 5. Emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en los escenarios de ambición actual y alta ambición. Adaptado (IPCC, 2020).

El sector transporte necesita descarbonizarse más rápido que cualquier otro sector para alcanzar los niveles necesarios del Acuerdo de París (una reducción del 70 - 80 % por debajo de las emisiones de 2015). Para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas en 2050, la descarbonización debe comenzar de inmediato, ya que las emisiones de CO₂ del transporte deben reducirse un 3 % anual hasta 2030 (OECD, 2023). Lograr esta reducción requiere políticas más ambiciosas y acciones más rápidas que combinen una mezcla de cambio de modo de transporte, gestión de la demanda y medidas de mejora de los vehículos y el combustible.

En el ámbito internacional, las Naciones Unidas para el Cambio Climático ha elaborado una serie de hojas de ruta (“Objetivos”) para más de 30 sectores de la economía y objetivos de transición que deben alcanzarse de aquí a 2030 para mantener el rumbo hacia los objetivos del Acuerdo de París (OECD, 2023). Estos Objetivos de Desarrollo 2030 establecen objetivos ambiciosos para el sector del transporte, centrándose en las transiciones energéticas para el transporte por carretera, la aviación y el transporte marítimo con el objetivo de crear economías de escala gracias a la alineación entre las políticas nacionales de los países. Estos objetivos se centran específicamente en los cambios tecnológicos, más que en los esfuerzos por cambiar la demanda o el cambio modal. La Tabla 2 indica los Objetivos de Desarrollo 2030 y las recomendaciones políticas para avanzar en el panorama de la política del sector transporte.

Tabla 2. Objetivos de Desarrollo 2030 para la descarbonización del sector del transporte. (OECD, 2023)

Sector/ industria del transporte	Objetivos de desarrollo
Turismos con motor de combustión interna	Los vehículos cero emisiones representarán el 100 % de las ventas de turismos y furgonetas en los principales mercados en 2035.
Autobuses con motor de combustión interna	Los vehículos cero emisiones representarán el 100 % de las ventas de autobuses en los principales mercados en 2030.
Vehículos pesados con motor de combustión interna	Los vehículos cero emisiones representarán el 100 % de las ventas de vehículos pesados en los principales mercados en 2040.
Envío	Los combustibles de cero emisiones constituirán el 100 % de los combustibles para el transporte marítimo en 2050.
Aviación	Los combustibles sostenibles para la aviación constituirán el 100 % de los combustibles mundiales en 2050.

Para poner en perspectiva los objetivos de CO₂ que se han indicado anteriormente, es necesario observar las tendencias pasadas en la mejora de las emisiones de GEI de los vehículos como el CO₂. La Figura 6, resume las reducciones de las emisiones logradas en las dos últimas décadas gracias a las mejoras introducidas tanto en los motores como en los vehículos.

Tras años de reducción de las emisiones de CO₂ del tubo de escape, se observa que las mejoras se han estancado en los últimos años. En 2019, las emisiones de CO₂ de los turismos en Europa aumentaron por tercer año consecutivo, alcanzando los 122 g/km, un aumento de 2 g/km en comparación con 2018. La cuota de mercado de los vehículos diésel en Europa ha disminuido significativamente, pasando de casi el 50 % en 2015 a menos del 30 % en 2020, lo que ha provocado en parte, este aumento de las emisiones de CO₂. Dado el mayor ahorro de combustible de los motores diésel (en comparación con los vehículos de gasolina), la reducción de las ventas de diésel hace que el objetivo sea aún más difícil de alcanzar. Es evidente, por tanto, que para cumplir los futuros límites, es imprescindible una adopción significativa de tecnologías avanzadas de motores de combustión interna, así como la adopción de otras tecnologías de bajas emisiones (Conway et al., 2021).

Las normativas anticontaminación de la UE en términos de la automoción (normativa EURO) han producido la disminución en la contaminación de los vehículos de combustión interna tal y como se muestra en la Figura 6 B, estas comenzaron en 1992 con la Euro 1, para reducir las emisiones contaminantes de los vehículos y mejorar la calidad del aire. Cada normativa sucesiva ha impuesto límites más estrictos sobre las emisiones de sustancias nocivas. La Euro 6, la más estricta hasta ahora, se implementó en 2014. La Euro 7, propuesta para 2025, introducirá regulaciones aún más rigurosas, incluyendo emisiones no provenientes del escape. Estos estándares son cruciales para mejorar la calidad del aire y proteger la salud pública.

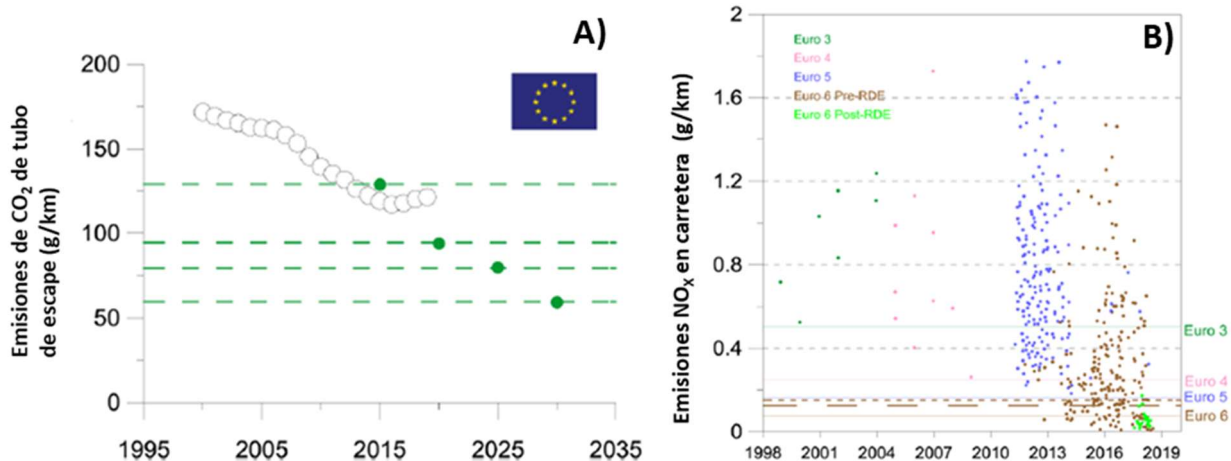


Figura 6. Emisiones de CO₂ en carretera medidas en vehículos diésel y gasolina que abarcan modelos de los años 2012-2019 (A), y mediciones de emisiones de NO_x en carretera de vehículos diésel Euro 3 - Euro 6, (B). Adaptado (Conway et al., 2021).

Sin embargo, las crecientes normativas anticontaminación tal y como se ha indicado, no son suficientes para alcanzar los objetivos anticontaminación y climáticos y, por ello, surge la necesidad de implementar nuevas tecnologías de propulsión de vehículos menos contaminantes que permitan la reducción de GEI alejándose de los medios actuales que aunque si bien es cierto, se han ido optimizando y reduciendo considerablemente sus emisiones, su potencial de reducción es cada vez más estrecho haciendo inalcanzable la neutralidad en

sus emisiones. Por ello, el presente documento se centra en el estudio ambiental, energético y económico, así como su análisis comparativo, de dos tipos de tecnologías que permitan la sostenibilidad ambiental del sector de la automoción en términos de contaminación de GEI. Estas dos vías son los vehículos eléctricos de baterías y los vehículos e-fuels.

3. Objetivos Y Alcance Del Trabajo

El presente proyecto tiene como objetivo principal el estudio comparativo de los e-fuels y los vehículos eléctricos de baterías enfocándose en los aspectos energéticos, económicos y ambientales. A través de este estudio se pretende determinar la viabilidad de los e-fuels y los vehículos eléctricos de baterías como alternativa sostenible del sector automotriz a los actuales combustibles de origen fósiles, evaluando los factores económicos, de eficiencia energética y emisiones asociadas. Estos dos sistemas de propulsión alternativos a los vehículos convencionales, aunque distan en cuanto a su tecnología, dentro del sector automoción, poseen el mismo objetivo y es la generación de energía para la propulsión de vehículos que permita la sostenibilidad del sector.

Con este fin, se plantean los siguientes objetivos parciales:

- Por una parte, en cuanto al aspecto energético, se estudian las diferentes vías de almacenamiento para el caso de las baterías, así como de los diferentes e-fuels existentes y sus rutas de obtención, producciones, densidades de energías, de potencia y eficiencias de los principales procesos.
- Por otra parte, en cuanto a los elementos económicos, se evalúan los costes asociados con la producción y el uso de las diferentes alternativas/fuentes de almacenamiento dentro de los e-fuels y baterías, junto con los términos financieros estándares que definen la viabilidad económica de las inversiones como son el CAPEX y OPEX.
- Finalmente, se estudian los impactos ambientales producidos por cada una de las dos tecnologías durante su ciclo de vida teniendo en cuenta tanto las emisiones durante su fabricación, uso y fin de vida. Es decir, se evalúan los impactos ambientales relevantes en términos de “de la cuna a la cuna” (o, por su término en inglés “cradle to cradle”) de manera que se ofrece una visión integral más completa considerando la generación de residuos y su tratamiento, así como su potencial de reutilización o reciclaje.

Todo ello, bajo el prisma de la política y regulaciones que influyen en la adopción de estas tecnologías, así como los retos y oportunidades para su integración en el mercado automotriz. Este análisis permitirá identificar las barreras existentes para la implementación de los e-fuels y los vehículos eléctricos de baterías y proponer recomendaciones para superarlas.

4. Metodología

La metodología llevada a cabo para la ejecución del proyecto se divide en cuatro pilares principales. Cabe destacar que se trata de un estudio bibliográfico cuya finalidad es recopilar la información más reciente sobre el estado del arte en cuanto a las alternativas de propulsión en el sector automotriz, centrándose específicamente en la electrificación y los e-fuels en contraposición a las formas convencionales de propulsión.

Por ello, inicialmente, se definen los objetivos y el alcance del proyecto, mediante el establecimiento de los aspectos relevantes del estudio, como son los aspectos energéticos, económicos y ambientales de las dos alternativas de vehículos: eléctricos de baterías y e-fuels.

El primer pilar corresponde a la búsqueda del estado del arte para el conocimiento de la problemática actual con respecto al sector del transporte y, en particular, por carretera referido a la automoción ligera. Esta problemática está orientada al impacto ambiental producido por los vehículos ligeros de combustión interna, así como a la legislación que rige y tracciona al sector hacia un cambio de modelo tan disruptivo como es su desvinculación de los combustibles de origen fósil.

Una vez identificada la problemática actual, el segundo pilar, se corresponde con la evaluación energética de los e-fuels y los vehículos eléctricos de baterías, incluyendo las diversas vías para la producción, evaluando cada uno sus rendimientos, así como las materias primas requeridas y tecnologías.

El tercer pilar, se basa en el análisis de costos, considerando los distintos procesos de producción, materias primas empleadas, tipologías y medios de almacenamiento.

El cuarto y, último pilar, correspondiente a la evaluación medioambiental, la cual consta de la recopilación de los impactos ambientales más relevantes en cada una de las etapas del ciclo de vida. Estos evalúan la producción, uso y el fin de vida.

Finalmente, se realiza la comparación y discusión de las conclusiones obtenidas.

Como herramienta visual para la gestión y seguimiento eficiente del progreso del proyecto, en la Figura 7, se representa el diagrama de Gantt que resume la planificación del proyecto.

		2023								2024						
		N				D				E			F			
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	
INICIO	FIN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
T1	BÚSQUEDA DEL ESTADO DEL ARTE DE LA PROBLEMÁTICA ACTUAL EN EL SECTOR TRANSPORTE	1	3													
T1.1	Investigación sobre el impacto ambiental de los vehículos de combustión interna.	1	3													
T1.2	Análisis de la legislación actual en el sector de la automoción.	2	3													
T1.3	Identificación de cambios necesarios para la desvinculación de los combustibles fósiles.	2	3													
T2	EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE E-FUELS Y VEHÍCULOS ELÉCTRICOS DE BATERÍAS	4	7													
T2.1	Evaluación de los procesos de producción de e-fuels.	4	6													
T2.2	Análisis de materias primas requeridas y rendimientos asociados.	5	6													
T2.3	Investigación de tecnologías de almacenamiento de electricidad para vehículos eléctricos.	6	7													
T2.4	Evaluación de los consumos energéticos y los rendimientos.	6	7													
T3	ANÁLISIS DE COSTOS	8	11													
T3.1	Evaluación de costos según el método de fabricación de e-fuels y vehículos eléctricos.	8	10													
T3.2	Análisis de costos en función de las materias primas empleadas.	9	10													
T3.3	Consideración de costos asociados a la tipología y medios de almacenamiento.	10	11													
T4	EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL	11	13													
T4.1	Recopilación de impactos ambientales en la producción de e-fuels y vehículos eléctricos.	11	12													
T4.2	Evaluación de impactos durante el uso de estos productos.	12	13													
T4.3	Análisis de impactos ambientales en el fin de vida de e-fuels y vehículos eléctricos.	13	13													
T5	CONCLUSIONES, ANÁLISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN	14	14													
T5.1	Comparación y discusión	14	14													

Figura 7. Diagrama de Gantt que representa la planificación temporal y las tareas clave de la investigación sobre alternativas de propulsión en el sector automotriz.

5. Beneficios que aporta el trabajo

El presente trabajo pretende recopilar y sintetizar aquellos aspectos relevantes de la actualidad y, con perspectivas de futuro, del sector transporte y específicamente referido a la automoción. Para ello, se pretende proporcionar una base de datos sólida de toda la cadena de valor del sector automotriz, incluyendo la producción, uso y fin de vida de los aspectos determinantes como son los aspectos energéticos, económicos y ambientales.

Se busca identificar cómo las prácticas actuales en la industria automotriz impactan en estos ámbitos y explorar las tendencias emergentes que podrían modelar el futuro del transporte. Al examinar la cadena de valor del sector, desde la obtención de materias primas pasando por la producción, uso y hasta su fin de vida.

Además, se analizarán las innovaciones tecnológicas, de los vehículos eléctricos y los combustibles alternativos (e-fuels), que tienen el potencial de transformar el perfil energético y ambiental del transporte.

Se considerará el papel de las políticas públicas y las regulaciones en la promoción de prácticas más sostenibles dentro del sector, en los patrones de uso de los vehículos y sus implicaciones económicas y ambientales.

Este trabajo también pretende evaluar los desafíos asociados con la transición hacia un sector de transporte más sostenible, incluyendo las barreras tecnológicas, económicas y estructurales.

6. Vehículos A E-Fuels

Antes de abordar los temas centrales, cabe definir y distinguir las terminologías de e-fuels (o electrocombustibles, en castellano) y combustibles sintéticos. Dado que ambos términos se emplean en el mismo contexto, son mostrados en la bibliografía y empleados por el público general, por tanto, es de gran importancia conocer su definición para el uso adecuado de los mismos.

Aunque no existe una clara distinción entre ambos términos, el término combustible sintético es definido por la Administración de Información Energética (EIA) como un combustible producido a partir de carbón, gas natural y biomasa, es decir, a partir de materias primas distintas al crudo del petróleo mediante una conversión termoquímica. La Agencia Internacional de la Energía (AIE) ofrece una definición similar con la exclusión de la biomasa como fuente de combustible. Estas definiciones se refieren a los combustibles sintéticos como procesos “PTL” (power to liquid) derivados del carbón, el gas natural y, en algunos casos, la biomasa. Es decir, combustible producido mediante procesos “PTL”, carbón a líquido (CTL), gas a líquido (GTL) y biomasa a líquido (BTL) que terminan todos con la síntesis de Fischer-Tropsch. Debido a ello, el empleo del término combustible sintético no refleja cuáles son los principales recursos para su producción. El término combustible sintético, referido al proceso de producción de biomasa a líquido, también se define como biocombustible (Ridjan et al., 2016).

Cuando se trata de los recursos utilizados para producir combustibles sintéticos, éstos pueden variar desde combustibles fósiles como el carbón o el gas natural hasta una fuente de carbono e hidrógeno, que se produce con energía renovable mediante la electrólisis del agua. En consecuencia, el combustible sintético se utiliza como un término genérico que no está asociado a un proceso de producción específica ni a recursos concretos. Esto dificulta la identificación del término que se utilizará para los combustibles renovables producidos sin utilizar fuentes fósiles y mediante la conversión de electricidad en combustible en los futuros sistemas energéticos. La ausencia de referencias claras para esta terminología, abre un espacio para posibles confusiones y la promoción de tecnologías y combustibles no deseables (Ridjan et al., 2016).

Los electrocombustibles o, de ahora en adelante e-fuels, son combustibles producidos almacenando electricidad como energía química en forma de combustibles líquidos o gaseosos en los procesos denominados “xTE” (power to e-fuel) correspondientemente, carbón a e-fuel (CTE), biomasa a e-fuel (BTE) o CO₂ a e-fuel (CO₂TE). Con el término e-fuel, generalmente se utiliza CO₂ como fuente principal para la producción del combustible, pero con diferentes productos finales. Sin embargo, indicar que el término tiene diferentes significados, o más concretamente, se refiere a diferentes procesos de producción de los combustibles. La principal característica de los e-fuels es el uso de electricidad en el proceso de producción. Debido a la conexión entre el CO₂ empleado y la electricidad mediante fuentes renovables para la electrólisis del agua y la obtención de H₂ da lugar a combustibles neutros en carbono. Este es el rasgo distintivo clave que puede perderse si los e-fuels se identifican como combustibles sintéticos (Reddy et al., 2023).

La idea fundamental de los combustibles sintéticos y e-fuels es compartida siendo esta la de brindar nuevas opciones de combustibles que puedan sustituir a los combustibles fósiles en el sector del transporte. Sin embargo, es necesaria la distinción entre ambos términos. En la literatura, la mayoría de los artículos se refieren a los combustibles sintéticos como combustibles procesados PTL, por ello, los combustibles sintéticos deben mantenerse dentro del ámbito de los combustibles que se producen por gasificación del

carbón, el gas natural o la biomasa en los llamados procesos PTL a través de Fischer-Tropsch. Por lo tanto, no pueden denominarse combustibles sintéticos renovables, sino combustibles sintéticos fósiles. La única vía renovable de combustibles sintéticos es el proceso de biomasa a líquido. Para diferenciar los recursos iniciales, debe fomentarse el uso de las abreviaturas CTL, GTL y BTL (Reddy et al., 2023).

Un sistema de energía renovable con e-fuels permite el aprovechamiento energético de la energía renovable intermitente, por ello es esencial distinguir entre los procesos de producción muy diferentes asociados a los combustibles sintéticos y los e-fuels, ya que ambos tienen impactos diferentes en el sistema energético. La terminología más acertada es de PTL para los combustibles sintéticos convencionales y PTE para los e-fuels. Cuando el combustible se produce a partir de la captura de CO₂, ya sea de puntos de fuentes de emisión o a través de la captura de aire y que la electricidad para la electrólisis procede de fuentes renovables se denominan e-fuels renovables. Sin embargo, en el presente documento, por simplicidad, a partir de ahora se denominará a los e-fuels renovables como e-fuels.

De esta manera, en el presente trabajo se define como e-fuels aquellos que se producen almacenando energía eléctrica, como energía química, en forma de combustibles gaseosos o líquidos, diferenciándolos de los biocombustibles. Los e-fuels se forman a partir de hidrógeno electrolítico (es decir, hidrógeno producido a partir de electricidad por energía renovable) y carbono (o nitrógeno), donde el carbono se captura de una fuente puntual de emisión o del aire (Grahn et al., 2022).

Combinando químicamente el carbono (o el nitrógeno) con hidrógeno, se producen diversos e-fuels, como se ilustra en la Figura 8, donde se muestran sus correspondientes vías de producción.

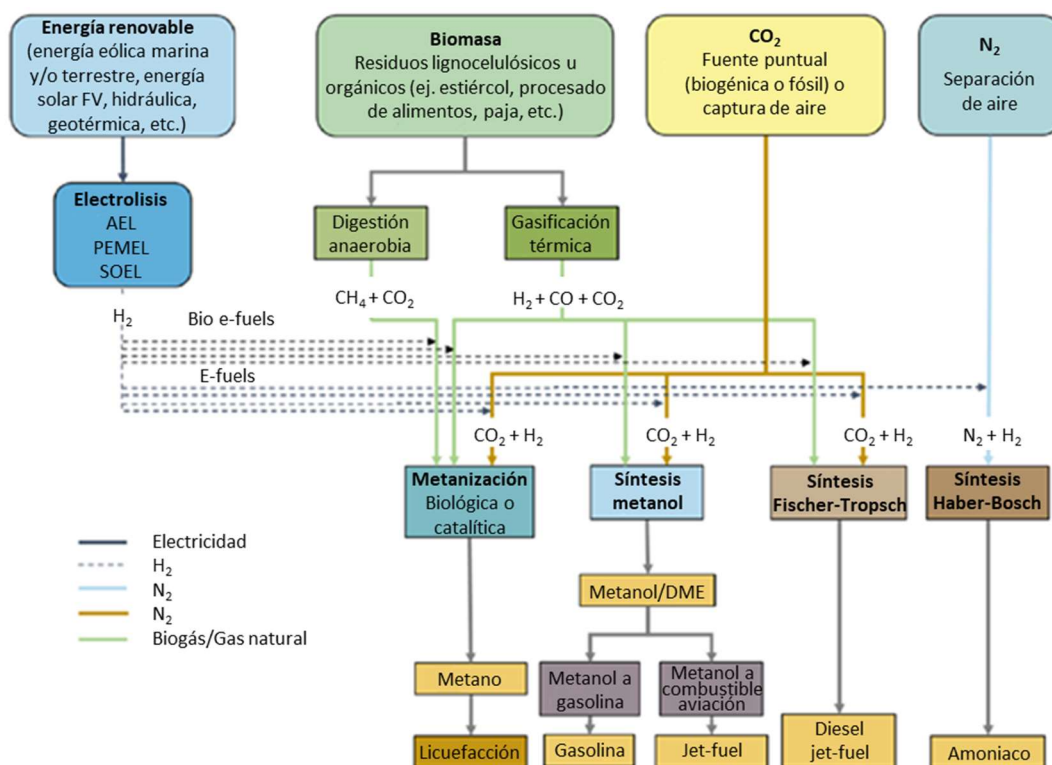


Figura 8. Vías de producción, incluidas las materias primas y los combustibles producidos, para las principales opciones de e-fuels (Grahn et al., 2022).

Dado que el objeto del alcance del estudio son los e-fuels, quedan excluidos de este estudio los biofuels (combustibles derivados de la biomasa producidos sin utilizar hidrógeno electrolítico) no así los bioe-fuels (los cuales se incluyen dentro de los e-fuels) que se definen como combustibles generados mediante la adición de hidrógeno electrolítico a un proceso de conversión basado en la biomasa (como la digestión anaerobia o la gasificación de la biomasa) (Grahn et al., 2022).

La producción de e-fuels consta esencialmente de cuatro etapas: producción de hidrógeno, captura de nitrógeno (N_2) o dióxido de carbono (CO_2), conversión del gas de alimentación en nuevas moléculas en una síntesis y mejora final del producto. En la siguiente Figura 9, se ilustra el diagrama de bloques esquemático para la producción de e-fuels.

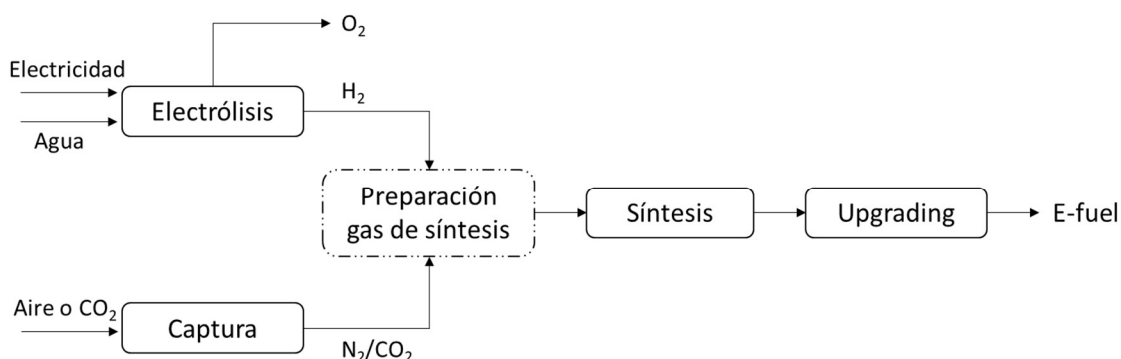


Figura 9. Ilustración esquemática de los principales procesos de producción de e-fuels. Adaptado (IEA, 2023).

En la siguiente Tabla 3 y Tabla 4 se muestran los usos potenciales que tienen los distintos e-fuels, los cuales se distinguen principalmente en función de su naturaleza líquida o gaseosa y su perspectiva actual en función de diversos parámetros tales como poderes caloríficos (inferior), almacenamiento, infraestructura, etc., respectivamente. Dentro del sector del transporte y, en particular el de vehículos ligeros, los e-fuels con mayor potencial, destacan el e-hidrógeno y el e-metanol.

Para el caso del e-hidrógeno, como puntos fuertes destaca que se trata de un e-fuel con un alto poder calorífico inferior y que, a su vez, ya existe un desarrollo de tren motriz como son los vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) (aunque estos aun no son una opción generalizada). Sin embargo, como contrapartida, es necesaria una infraestructura adicional que actualmente no está desarrollada para su distribución y recarga. Además, presenta una dificultad añadida en cuanto en cuanto a su almacenamiento, cuyas vías de almacenamiento más comunes implican; (1) almacenamiento a alta presión, generalmente entre 350 – 700 bar, (2) almacenamiento criogénico a temperaturas cercanas a -253 °C , (3) otras vías tales como absorbentes en forma de carbón activo e hidruros cuyas vías se encuentran en fases tempranas de desarrollo.

Con respecto al e-metanol, este, presenta como ventajas un medio de almacenamiento sencillo y viable, dado su estado físico natural en forma líquida, además de no necesitar un sistema de infraestructura, distribución y tren de motriz por desarrollar. Sin embargo, presenta inconvenientes tales como su mayor toxicidad y elevado riesgo de peligrosidad (en comparación por ejemplo con el etanol), así como de su menor poder calorífico (inferior).

Tabla 3. Diversos usos posibles de los e-fuels (Soler, 2019).

	E-Fuels	Vehículos Ligeros	Vehículos Pesados	Transporte Marítimo	Aviación	Otros Sectores (Fuera de la Aviación)
Gas	E-Metano (CH ₄)	X	XX	XX		XXX
	E-Hidrógeno (H ₂)	XX	XX	X		X
Líquido	E-Amoniaco (NH ₃)	X	X	XXX		
	E-Metanol (CH ₃ OH)	XX	X	X		
	E-DME/E-OME	X	XX	XX		
	E-Gasolina	X				
	E-Diesel	X	XXX	XX		
	E-Jet					XXX

"X" representa una estimación inicial del papel potencial relativo de los distintos e-fuels en los segmentos de transporte (ninguna 'X'= ningún potencial previsto)

Los "otros sectores" incluyen la industria, la construcción y la energía.

Tabla 4. Panorama cualitativo de los e-fuels (Soler, 2019).

	E-Fuels	Poder Calorífico Inferior, MJ/Kg / MJ/L	Almacenamiento	Infraestructura adicional	Desarrollo de tren motriz
Gas	E-Metano	46,6 / 0,04	Medio ^a	No	No necesario
	E-Hidrógeno	120 / 0,01	Difícil	Sí	No necesario ^b
Líquido	E-Amoniaco	18,6 / 14,1	Fácil	Sí	Necesario
	E-Metanol	19,9 / 15,8	Fácil	No	Necesario
	E-DME	28,4 / 19,0	Fácil	Sí	Necesario
	E-OME	19,2 / 20,5	Fácil	Sí	Necesario
	E-Gasolina ^c	41,5 / 31,0	Fácil	No	No necesario
	E-Diesel ^c	44,0 / 34,3	Fácil	No	No necesario
	E-Jet ^c	44,1 / 33,3	Fácil	No	No necesario

^a El e-metano podría utilizar la mayor parte de la logística existente, incluidos los sistemas de transporte, almacenamiento y distribución del gas natural, pero su almacenamiento no es tan fácil como en el caso de los combustibles líquidos.

^b Los FCEV (vehículos eléctricos de pila de combustible) están disponibles comercialmente, pero su número es limitado y es difícil evaluar si se convertirán en una opción generalizada.

^c Las propiedades se refieren a los combustibles fósiles convencionales debido a la falta de propiedades públicas disponibles para los e-fuels (aunque se espera que las propiedades sean similares, se necesita mayor investigación).

Dados los e-fuels más prometedores, a continuación, en la Figura 10, se muestran las principales vías para su obtención. Como son la síntesis de Fitcher-Tropsch (F-T) y la síntesis de metanol para la producción de e-fuels líquidos. Para ello, se parte de energía renovable para la electrólisis y obtención de hidrógeno que posteriormente combinada con CO₂ vía síntesis de metanol o Fischer-Tropsch posibilita la producción de diversos tipos de e-fuels líquidos.

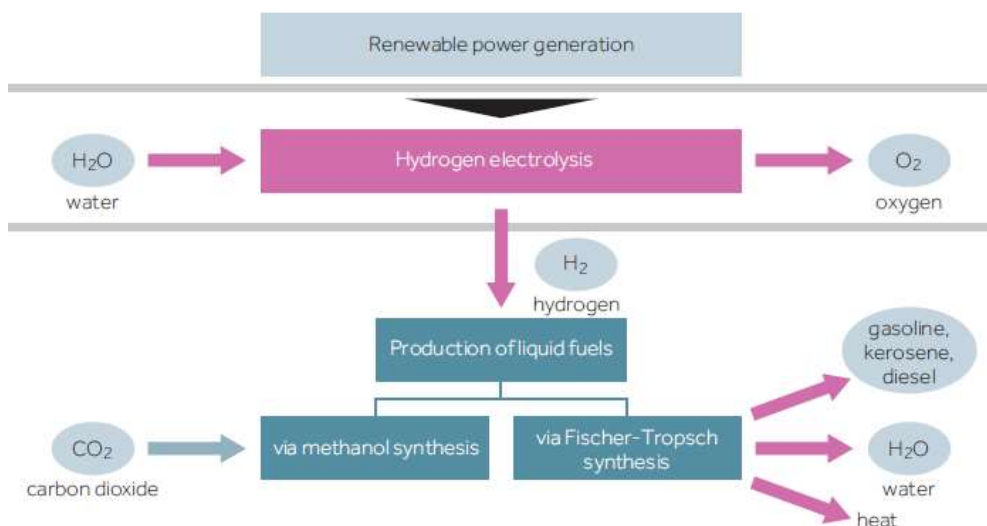


Figura 10. Rutas de producción de e-fuel líquidos (Soler, 2019).

La producción de los e-fuels líquidos mediante la reacción de F-T da lugar a una mezcla de combustibles, como nafta/gasolina, queroseno, diésel/gasóleo, aceites, etc. La Figura 11, muestra la distribución típica de la longitud de los e-hidrocarburos que se obtienen tras el proceso F-T antes de ser llevado a las siguientes etapas de procesado o upgrading. Su distribución depende de diversos factores, tales como el tipo de catalizador empleado (en base Fe o Ti) y las condiciones de operación. Se observa que la selectividad de la reacción es mayor a cadenas cortas ($C_{>5}$ y $C_{<25}$) en detrimentos de las intermedias ($C_{>25}$ hasta $C_{>50}$).

Además, las cadenas largas ($C_{>25}$) pueden ser craqueadas para aumentar el rendimiento a destilados medios. Es decir, las moléculas intermedias (compuestas por ceras, gasóleos pesados, etc.), pueden destinarse a una unidad de hidrocrqueo para la obtención de destilados medios que posteriormente purificados, resulten en fracciones nafta, queroseno y/o gasóleo.

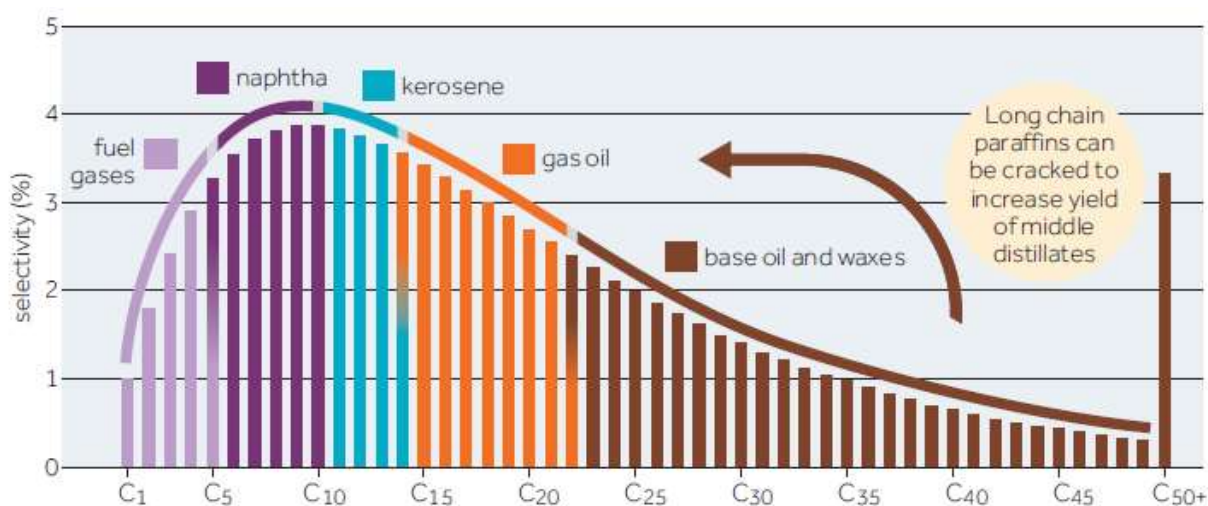


Figura 11. Productos de e-fuel líquidos Fischer-Tropsch (Soler, 2019).

En cuanto al balance de materia y energía del proceso global simplificado para la obtención de e-fuels líquidos. Para la obtención de 1 L de PtL (“Power to Liquid”), como materias primas se requieren de 3,7 a 4,5 L de agua, 2,9 a 3,6 kg de CO₂ y de 82 a 99 MJ de energía renovable, tal y como se ilustra en la Figura 12.

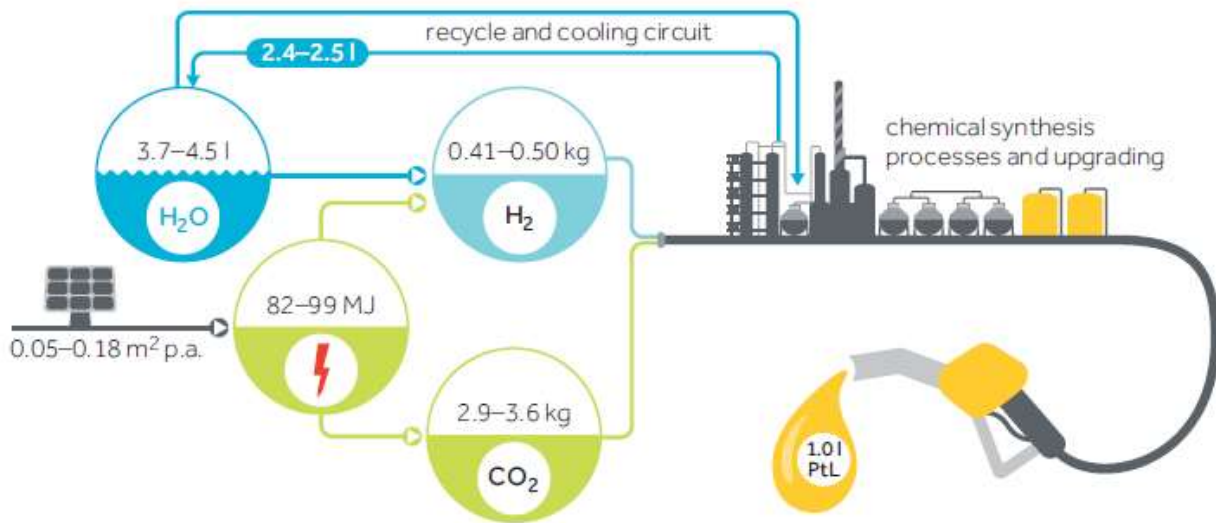


Figura 12. Recursos necesarios para la producción de e-fuels líquidos (Soler, 2019).

En cuanto al impacto ambiental de los e-fuels líquidos (PtE), en la Figura 13 se muestra el impacto ambiental de los e-fuel líquidos (indicado como PtL) con distinto alcance; “WtW” de pozo a rueda, “TtW” de tanque a rueda, “WtT” de pozo a tanque y “WtT credit” de pozo a tanque con crédito. Además de su comparación con otro tipo de vías de propulsión.

Se puede observar que teniendo en cuenta el alcance de “WtT” de pozo a tanque, es decir, todas las emisiones y el consumo de energía desde la obtención del combustible hasta que este llega al tanque del vehículo que incluye la producción, el procesamiento, el transporte y el almacenamiento del combustible, las emisiones de CO₂ representan tan solo valores de 4 g/km. Esto se debe a que no se tiene en cuenta las emisiones durante su consumo o uso que sí tiene en cuenta el alcance “TtW” y que su resultado, produce un aumento de hasta casi 100 g CO₂/km. Las emisiones negativas (o compensaciones) referentes a “WtT crédito”, hace referencia a que el transporte de los e-fuels se realiza mediante combustibles bajos en carbono y, de manera que la misma cantidad de CO₂ que se emite por el tubo de escape durante el uso del vehículo (propulsado por e-fuels) es capturado del aire mientras se produce. Compensando de esta manera sus emisiones.

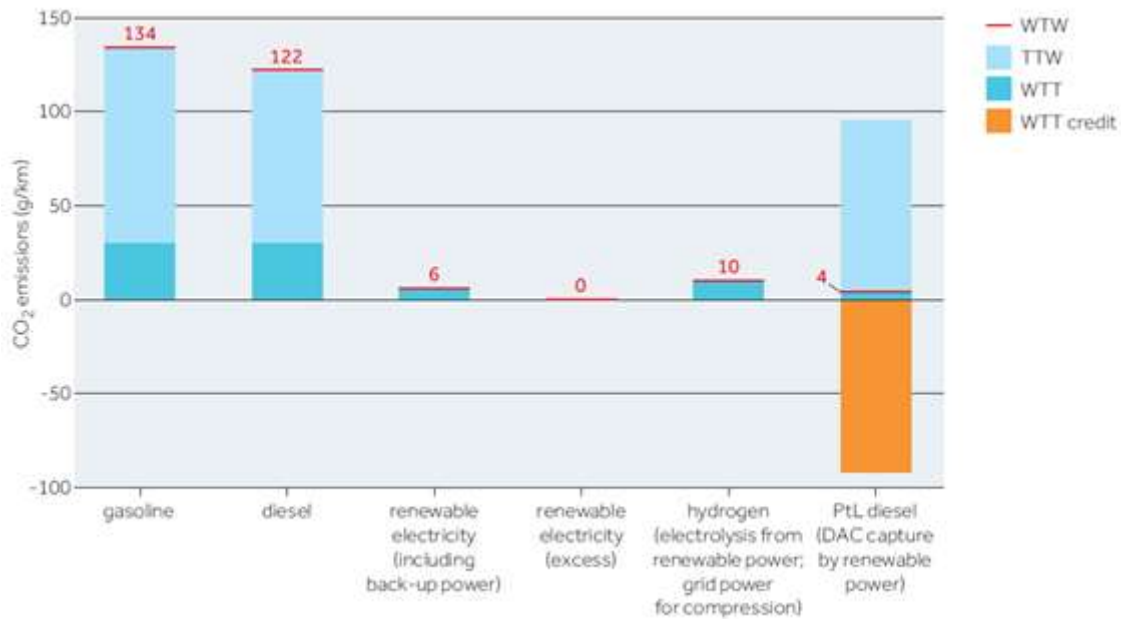


Figura 13. Intensidad de GEI (g CO₂/km) de diferentes combinaciones de combustibles para vehículos ligeros (Soler, 2019).

A continuación, se describe las etapas principales involucradas en la producción de e-fuels tal y como se muestra en la Figura 9.

Producción de hidrógeno (H₂)

La electrólisis es el componente central del proceso de los e-fuels. Consiste en dividir las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno mediante una corriente eléctrica y separarlas en dos flujos de productos.

Actualmente existen dos grandes grupos de electrolizadores: los electrolizadores alcalinos (AEL) y los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM). En una fase más prematura también se encuentran otros electrolizadores como son los de óxido sólido (SOEC) y los electrolizadores de membrana de intercambio aniónico (AEM) (Schröer, 2021). En la siguiente Figura 14, se muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso de la electrólisis del agua para la separación del H₂.

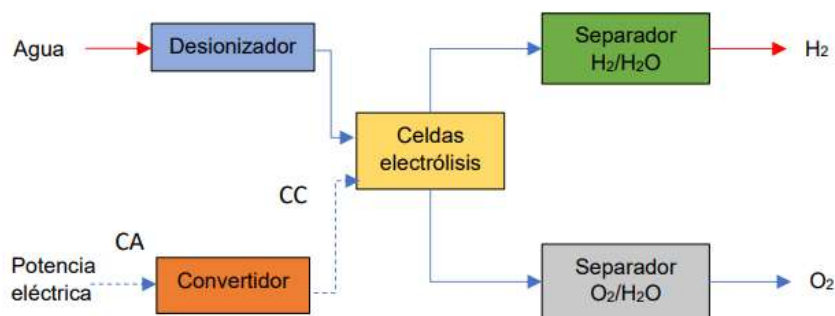


Figura 14. Diagrama de flujo simplificado del proceso de electrólisis del agua (Schröer, 2021).

El electrolizador alcalino (AEL) se basa en una solución electrolítica alcalina, como hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH) como medio para la conducción de iones. Es reconocida como una tecnología madura y avanzada con unos costos comedidos dados los catalizadores empleados en base níquel y sus aleaciones. Sin embargo, requiere una purificación significativa del hidrógeno y tiene limitaciones en la densidad de corriente.

La electrólisis mediante PEMEL utiliza una membrana sólida de intercambio de protones (PEM), reemplazando el electrolito líquido y permitiendo el contacto directo entre los electrodos ocasionando el paso de protones mientras separa los gases en ambos electrodos. Este tipo de electrolizador proporciona una alta pureza del hidrógeno producido y puede operar a mayores densidades de corriente. Sin embargo, los costos pueden ser más altos debido al uso de catalizadores a base de metales preciosos.

Los electrolizadores de celda electrolítica de óxido sólido (SOEL), por su parte, depende de la electrólisis del vapor de agua a temperaturas elevadas (800 – 1000 °C), reduciendo las demandas energéticas para la reacción de división del agua y mejorando la eficiencia en la conversión de energía en hidrógeno (Albistur, 2022) dado que permite la producción de gas de síntesis en un solo paso, aumentando la eficiencia del proceso. Esta tecnología, se encuentra en una fase de desarrollo más temprana en comparación con AEL y PEM (Schröer, 2021).

En cuanto los electrolizadores de membrana de intercambio aniónico (AEM) representan una tecnología en fase de desarrollo y se basa en una membrana de intercambio aniónico que permite el paso de aniones (específicamente, de iones hidroxilos) en lugar de protones. Esto permite el uso de agua como el reactivo directo en el lado del ánodo, similar a los sistemas PEM, pero con la posibilidad de utilizar catalizadores más económicos, como en los sistemas AEL. La principal diferencia de los electrolizadores tipo AEM radica en que el transporte de iones a través de la membrana, son aniones en lugar de protones.

En la siguiente Tabla 5 se muestra la comparativa de las tecnologías de electrolizadores alcalina (AEL), membrana sólida de intercambio de protones (PEM) y óxido sólido (SOEL).

Tabla 5. Comparativa de las tecnologías alcalina, PEM y óxido sólido (Albistur, 2022).

Característica	Alcalino (AEL)	PEM	Óxido Sólido (SOEL)
Semi-reacciones			
Cátodo	$2\text{H}_2\text{O}_{2(l)} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_{2(g)} + 2\text{OH}^-_{(ac)}$	$\text{H}^+_{(ac)} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_{2(g)}$	$\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_{2(g)} + \text{O}^{2-}$
Ánodo	$2\text{OH}^-_{(ac)} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_{2(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)} + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{H}^+_{(ac)} + \frac{1}{2}\text{O}_{2(g)} + 2\text{e}^-$	$\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_{2(g)} + 2\text{e}^-$
Electrodos y catalizadores			
Ánodo	Ni, Fe, óxidos metálicos	Ti + Ti/RuO ₂ , IrO ₂	Cerámico (Mn, La, Cr) Ni
Cátodo	Ni/Ni-Co, óxidos metálicos	Grafito, Ti + Pt	Zr + Ni/CeOx
Medio separador	Diafragma (NiO, PAM, Zirfon®)	Membrana	Membrana cerámica
Electrolito	KOH, NaOH	Electrolito polimérico sólido	Y ₂ O ₃ -ZrO ₂ , MgO-ZrO ₂
Ion transporte	OH ⁻	H ⁺	O ²⁻
Temperatura	60 - 85 °C	50 - 80 °C	800 - 1000 °C
Presión	< 30 bar	< 35 bar	1 - 5 bar

Densidad de corriente	200 - 600 mA/cm ²	< 2000 mA/cm ²	< 2000 mA/cm ²
Eficiencia global	60 - 70 %	65 - 75 %	85 - 95 %
Vida útil	> 95.000 h	55.000 - 75.000 h	En investigación
Consumo energía (kWh/Nm ²)	4,3 - 5	4,2 - 4,7	3,2 - 3,7
Característica	Alcalino (AEL)	PEM	Óxido Sólido (SOEL)
Semi-reacciones			
Cátodo	$2\text{H}_2\text{O}_{2(l)} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-_{(\text{ac})}$	$\text{H}^+_{(\text{ac})} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$	$\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + \text{O}^{2-}$
Ánodo	$2\text{OH}^-_{(\text{ac})} \rightarrow 1\frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}_{(l)} + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{H}^+_{(\text{ac})} + 1\frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{e}^-$	$\text{O}^{2-} \rightarrow 1\frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{e}^-$
Electrodos y catalizadores			
Ánodo	Ni, Fe, óxidos metálicos	Ti + Ti/RuO ₂ , IrO ₂	Cerámico (Mn, La, Cr) Ni
Cátodo	Ni/Ni-Co, óxidos metálicos	Grafito, Ti + Pt	Zr + Ni/CeOx
Medio separador	Diafragma (NiO, PAM, Zirfon®)	Membrana	Membrana cerámica
Electrolito	KOH, NaOH	Electrolito polimérico sólido	Y ₂ O ₃ -ZrO ₂ , MgO-ZrO ₂
Ion transporte	OH ⁻	H ⁺	O ²⁻
Temperatura	60 - 85 °C	50 - 80 °C	800 - 1000 °C
Presión	< 30 bar	< 35 bar	1 - 5 bar
Densidad de corriente	200 - 600 mA/cm ²	< 2000 mA/cm ²	< 2000 mA/cm ²
Eficiencia global	60 - 70 %	65 - 75 %	85 - 95 %
Vida útil	> 95.000 h	55.000 - 75.000 h	En investigación
Consumo energía (kWh/Nm ²)	4,3 - 5	4,2 - 4,7	3,2 - 3,7

A su vez, en la siguiente Tabla 6, se muestran los costes referentes a los electrolizadores que se emplean en la electrólisis del agua (Grahn et al., 2022) estimados a corto plazo (5 – 10 años) y a largo plazo (20 – 30 años).

Tabla 6. Costes e inversión de la electrólisis a corto plazo (5 – 10 años) y a largo plazo (20 – 30 años) en base a la eficiencia (Buttler & Spliethoff, 2018) (Grahn et al., 2022).

		A corto plazo (5 -10 años)	A largo plazo (20 – 30 años)
AEL	CAPEX (€/kW) <small>combustible</small>	800 (400 - 1300)	470 (380 - 560)
	OPEX (% de CAPEX) incl. sustitución de la stack de pila	2 % - 9 %	2 % - 5 %
	Eficiencia (poder calorífico inferior)	67 % (63 % - 71 %)	68 % (66 % - 70 %)
PEMEL	CAPEX (€/kW) <small>combustible</small>	1040 (500 - 2400)	545 (400 - 950)
	OPEX (% de CAPEX) incl. sustitución de la stack de pila	2 % - 11 %	2 % - 5 %
	Eficiencia (poder calorífico inferior)	64 % (58 % - 69 %)	68 % (62 % - 71 %)
SOEL	CAPEX (€/kW) <small>combustible</small>	1280 (450 - 4250)	380 (300 - 450)
	OPEX (% de CAPEX) incl. sustitución de la stack de pila	2 % - 3 %	2 % - 3 %
	Eficiencia (poder calorífico inferior)	78 % (76 % - 81 %)	79 % (75 % - 83 %)

El hidrógeno producido por la vía de la electrólisis del agua se conoce comúnmente como "hidrógeno verde". Este término se utiliza para diferenciarlo de otras formas de producción de hidrógeno basadas en fuentes de energía fósiles, como el hidrógeno "gris" producido a partir de gas natural mediante reformado con vapor o el hidrógeno "azul", que también proviene de fuentes de hidrocarburos, pero con captura y almacenamiento de carbono para reducir las emisiones de CO₂.

Esta categorización dependiendo de la intensidad de carbono del proceso de su producción (Reddy et al., 2023):

- El hidrógeno gris se produce a partir de combustibles fósiles mediante reformado con vapor. El 95 % de los 70 millones de toneladas de hidrógeno que se producen anualmente es hidrógeno gris, y más del 70 % del hidrógeno gris se produce a partir de gas natural (principalmente metano). El hidrógeno gris produce aproximadamente 10 kg de CO₂ por kg de H₂ producido, lo que sitúa su huella de carbono entre la del gas natural y la del carbón.
- El hidrógeno azul se produce mediante reformado con vapor, pero las plantas de producción se modernizan con tecnología de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS). Dependiendo de la tecnología y el combustible fósil utilizado, las plantas de hidrógeno azul pueden capturar entre el 50 y el 90 % de las emisiones de CO₂, produciendo aproximadamente entre 2 y 5 kg de CO₂ por kg de H₂ producido.
- El hidrógeno verde se produce por electrólisis, que divide el agua en hidrógeno y oxígeno mediante electricidad. Dado que la electrólisis no produce CO₂ como subproducto, el hidrógeno verde es la

única forma de hidrógeno con un proceso de producción sin emisiones de GEI. La electrólisis que utiliza electricidad generada por energía renovable (solar o eólica, entre otras) produce menos del 5 % de las emisiones de CO₂ del hidrógeno gris (distinto de cero debido a las emisiones generadas durante el transporte y la generación de electricidad). Los costos de producción de hidrógeno verde son significativamente más altos que los del hidrógeno azul o gris.

Esta última vía, es la deseada para la producción de e-fuels dado el beneficio medioambiental que supone. Sin embargo, tal y como se muestra en la siguiente Tabla 7, existe una categorización más extendida de los distintos tipos de hidrógeno en función de la vía de producción, así como de la energía empleada para su obtención.

Tabla 7. Resumen de los distintos tipos de hidrógeno y sus características (Reddy et al., 2023).

Hidrógeno	Tecnología	Alimentación/ fuente energía	Productos	Emisión (kg CO ₂ /kg H ₂)	Emisiones GEI	Costo (€/kg H ₂)
Dorado	Electrólisis	Agua + Energía Solar Directa	H ₂ + O ₂	0	Mínima	-
Amarillo	Electrólisis	Agua + Energía de Red de Origen Mixto	H ₂ + O ₂	0	Media	5,76 – 8,37
Rosa/Violeta	Electrólisis	Agua + Energía Nuclear	H ₂ + O ₂	0	Mínima	2,07 – 5,62
Verde	Electrólisis	Agua + Energía Renovable	H ₂ + O ₂	0	Mínima	2,17 – 7,02
Turquesa	Pirólisis	Metano	H ₂ + C	Carbono sólido	Carbono Sólido	1,90 – 1,99
Blanco	Fracking	Naturalmente Ocurrente	H ₂	0	Mínima	-
Azul	Reformado + CCUS	Gas Natural + CCUS, Carbón + CCUS	H ₂ + CO ₂ con CCUS	1–2	Baja	0,94 – 1,95
Gris	Reformado	Gas Natural	H ₂ + CO ₂	8,5–10,9	Media	0,64 – 1,24
Marrón	Gasificación	Carbón (Lignito)	H ₂ + CO ₂ liberado	20	Alta	1,14 – 1,90
Negro	Gasificación	Carbón (Bitumen)	H ₂ + CO ₂ liberado	21.8	Alta	1,14 – 1,90

Fuentes de carbono y nitrógeno

El carbono necesario para la síntesis de e-fuels, puede obtenerse por captura de fuentes puntuales de CO₂ como son las fuentes de emisión de diversos procesos de la industria química como la producción de etanol, las centrales eléctricas bioenergéticas, cementeras, etc. Las tecnologías de captura del CO₂ incluyen la absorción, el filtrado por membrana, la captura criogénica o la oxidación. La captura directa del aire (DAC) consiste en la retirada del CO₂ del aire. Este método supone un reto debido a las bajas concentraciones de CO₂ en el aire, pero ha ganado interés especialmente en combinación con el almacenamiento de carbono como método para conseguir emisiones negativas compensando las emisiones de CO₂. Una de las posibles rutas se basa en extraer selectivamente el CO₂ mediante empleo de absorbentes (basados principalmente en aminas) para la reacción con el CO₂ y formación de compuestos estables (tales como carbonatos) que posteriormente puede ser revertidos para la liberación del CO₂ y

regeneración del medio absorbente. Otra de las rutas para la captura directa del aire se basa en la captura o separación física del CO₂ basándose en las propiedades clave de este compuesto como es su solubilidad, capacidad de ser adsorbido, etc. pudiendo dar lugar a su separación mediante procesos criogénicos o adsorciones (Grahn et al., 2022).

Aunque los e-fuels basados en el carbono son los más investigados, también se ha considerado el amoníaco como portador de hidrógeno o como combustible en sí mismo. El e-amoniaco tiene la ventaja de no emitir CO₂ durante su uso, siendo por tanto una ruta especialmente interesante. Su materia prima, el N₂, un gas puro, permite separarse del aire mediante procesos de licuación y posterior destilación para la separación selectiva de los componentes en base a sus distintos puntos de ebullición. La baja temperatura de destilación puede conseguirse utilizando una unidad de separación de aire (ASU) u otras opciones tales como la adsorción por cambio de presión (PSA), que permite separar el oxígeno o el nitrógeno del aire sin licuefacción. La principal desventaja del ciclo PSA es el riesgo de elevadas pérdidas del gas derivadas de la liberación por la alta presión que se emplea. La ventaja del proceso ASU es la obtención de subproductos de interés como otros gases como el oxígeno y el argón.

Los costes de la captura de carbono (de fuentes fósiles y biogénicas) y nitrógeno de diversas fuentes se muestran en la siguiente Tabla 8 los cuales hacen referencia al término CAPEX. En aras de la uniformidad, todos los costes identificados se convierten en costes de producción, incluidos los CAPEX y OPEX anualizados (Grahn et al., 2022).

Tabla 8. Costes de producción de carbono y nitrógeno en €/tCO₂ o €/tN₂ calculados a partir del CAPEX (de vida útil de 20 a 30 años) y un OPEX referido del 2 al 5 % del CAPEX. No incluye el coste de la electricidad (Albrecht & Nguyen, 2019) (Daggash et al., 2018).

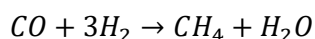
	A corto plazo (5 -10 años)	A largo plazo (20 – 30 años)
Fuentes puntuales de carbono	50 (20 - 260)	25 (10 - 100)
Carbono atmosférico	300 (25 - 778)	90 (15 - 105)
Captura de nitrógeno	9 (8 - 10)	7 (5 - 14)

Síntesis de e-fuels

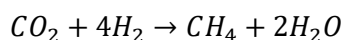
Dentro del presente estudio se considera que el hidrógeno y el carbono pueden combinarse para obtener diversos combustibles tal y como se ilustra en la Figura 8, mediante tres tecnologías principales: metanación, síntesis de metanol y síntesis de Fischer-Tropsch (FT). Además, de que el hidrógeno puede combinarse con nitrógeno para la producción de amoníaco en la síntesis Haber-Bosch. Antes de la síntesis, cabe destacar que los reactantes (H_2 y CO_2 o N_2) deben mezclarse en las cantidades adecuadas para cumplir los requisitos estequiométricos de la síntesis posterior (Grahn et al., 2022).

La metanación se realiza bajo la acción de catalizadores (metanación catalítica), principalmente basados en metales como níquel y otros preciosos como el platino o paladio, o bajo microorganismos metanogénicos (metanación biológica). La segunda, puede aplicarse como un proceso adicional en las plantas de biogás a unas temperaturas de operación relativamente bajas, mientras que la metanación catalítica se realiza a altas temperaturas y es muy exotérmica. Como principal ventaja, destaca que este calor sobrante puede aprovecharse para otros fines, como fuente de calor para la electrólisis de alta temperatura, lo que permite aumentar el rendimiento global de la planta de producción de e-fuels. Las reacciones involucradas en el proceso de metanación son las siguientes.

Ecuación 1. Reacción de metanación a partir de CO.

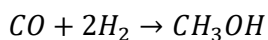


Ecuación 2. Reacción de metanación a partir de CO_2 .

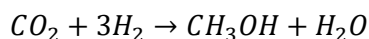


La síntesis de metanol es similar a la metanación catalítica, en la que el CO_2 y el CO del gas de síntesis se combinan con el H_2 para la generación de metanol. La reacción es exotérmica y se produce a altas temperaturas y presiones. El metanol resultante se puede hacer reaccionar posteriormente para obtener dimetiléter (DME), gasolina, gasóleo o combustible para aviones (jet-fuel). El metanol bruto producido incluye aproximadamente un 10 % de agua que se puede eliminar mediante destilación. Las reacciones del proceso de la síntesis de metanol son las siguientes (Biernacki et al., 2018).

Ecuación 3. Reacción de síntesis de metanol a partir de CO.

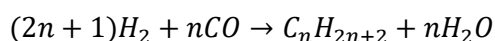


Ecuación 4. Reacción de síntesis de metanol a partir de CO_2 .



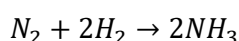
La síntesis F-T (Fischer-Tropsch) es una serie de reacciones en las que el CO y el H_2 reaccionan para formar hidrocarburos. Las reacciones se producen a altas temperaturas y presiones. La síntesis F-T suele ir precedida de una reacción inversa de water-gas shift (o reverse water-gas shift) para conseguir la estequiometría óptima H_2 / CO . Los líquidos F-T resultantes son una mezcla de parafinas, olefinas y alcoholes. Dependiendo de la mezcla y de la duración del proceso, los productos resultantes pueden ser gasolina, gasóleo, combustible para reactores, así como lubricantes, etc. La reacción genérica de síntesis de Fischer-Tropsch se muestra a continuación.

Ecuación 5. Reacción genérica de síntesis F-T.



La síntesis de amoníaco, por su parte, se obtiene mediante el proceso Haber-Bosch a través de la reacción catalítica (ver Ecuación 6) llevada a cabo a alta temperatura y presión. Al igual que las demás síntesis, también es exotérmica y dado que puede operar en discontinuo (con arranques y paradas), este modo de operación flexible puede ser interesante desde el punto de vista económico como medio para almacenamiento químico empleando el hidrógeno procedente de electricidad renovable intermitente evitando el costo de su almacenamiento.

Ecuación 6. Reacción Haber-Bosch.



En cuanto a la síntesis de bio-efuels, parte de diversas fuentes orgánicas como residuos forestales, residuos del procesado de alimentos, etc. para llevar a cabo los procesos anaeróbicos como las digestiones o fermentaciones. Estos procesos convierten la materia orgánica biodegradable en biogás, compuesto principalmente por metano (CH₄) y CO₂. Además, existen otros procesos donde se emplea biomasa como la gasificación, para la obtención del gas de síntesis (syngas) en presencia de un agente oxidante como el oxígeno o el vapor. El syngas resultante es una mezcla de H₂, CO, CO₂, CH₄, agua e hidrocarburos ligeros que se emplean en la producción de combustibles.

Tanto en la gasificación como en la digestión anaerobia, los bio-efuels, se producen mediante la reacción entre el hidrógeno y el carbono (CO o CO₂). Durante esta reacción, los combustibles producidos no utilizan todo el carbono contenido en la biomasa, y el exceso de carbono se libera como CO₂ biogénico. Para utilizar este exceso de carbono biogénico, es posible introducir hidrógeno adicional en el proceso de producción, lo que generará combustible adicional sin necesidad de la captura de carbono. Este proceso es el denominado bio-efuels y es una combinación de los e-fuels y los biofuels. En la siguiente Figura 15, se muestra el diagrama del proceso para su producción.

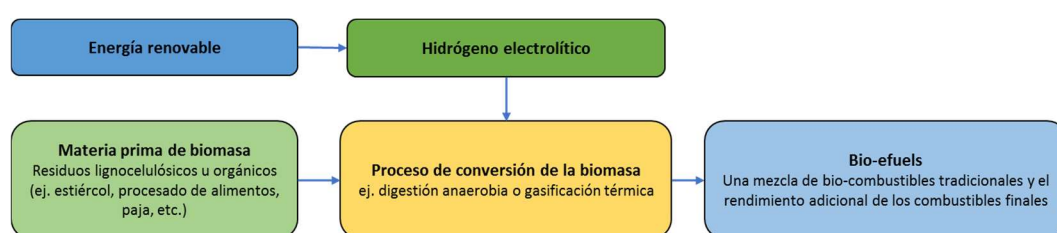


Figura 15. Diagrama de bloques del proceso de obtención de bio-efuels. Adaptado (Grahn et al., 2022).

Los distintos combustibles pueden clasificarse por su facilidad de uso. Los e-fuels "drop-in" (término que hace referencia a los e-fuels que pueden ser utilizados directamente en motores y sistemas de distribución existentes sin necesidad de modificaciones o adaptaciones especiales), como el e-keroseno, el e-diesel y la e-gasolina, son compatibles con la infraestructura de repostaje existente y pueden mezclarse con sus homólogos derivados del petróleo con ciertas limitaciones. Por el contrario, los e-fuels alternativos, como el e-amoniaco y el e-metanol, requieren inversiones en infraestructuras de distribución y equipos de consumo para su uso en el sector del transporte.

En la siguiente Tabla 9, se muestra el coste referido a los procesos de síntesis de e-fuels expresados en el CAPEX, así como sus respectivas eficiencias. Cabe destacar que la vida útil de las mismas varía entre 15 y 30 años, dependiendo del tipo de síntesis y que las eficiencias del proceso son las mismas a corto y largo plazo.

Tabla 9. Costes de síntesis de e-fuels (€/kW combustible) expresado en términos de CAPEX a corto plazo (5 - 10 años) y a largo plazo (20 - 30 años). Donde el CAPEX por kW de combustible es función del tamaño de la instalación; los valores a corto plazo reflejan plantas de pequeña escala, por debajo de 50 MW y, a largo plazo reflejan plantas de mayor capacidad (Grahn et al., 2022).

		A corto plazo (5 - 10 años)	A largo plazo (20 - 30 años)
Hidrógeno a metano	CAPEX (€/kW) combustible	450 (125 - 1350)	250 (75 - 700)
	Eficacia del proceso	70 % - 83 %	70 % - 83 %
Hidrógeno a metanol	CAPEX (€/kW) combustible	700 (300 - 1200)	300 (200 - 650)
	Eficacia del proceso	69 % - 89 %	69 % - 89 %
Hidrógeno a DME	CAPEX (€/kW) combustible	700 (300 - 1200)	300 (200 - 650)
	Eficacia del proceso	69 % - 89 %	69 % - 89 %
Metanol a gasolina (MTG)	CAPEX (€/kW) combustible	600	300 (250 - 370)
	Eficacia del proceso	86 %	86 %
Hidrógeno a Fischer-Tropsch	CAPEX (€/kW) combustible	1600 (400 - 2100)	750 (300 - 1030)
	Eficacia del proceso	59 % - 78 %	59 % - 78 %
Hidrógeno a amoníaco	CAPEX (€/kW) combustible	1300 (1300 - 2200)	800 (580 - 1100)
	Eficacia del proceso	61 % - 79 %	61 % - 79 %

Almacenamiento de H₂

Uno de los retos a los que se enfrenta la producción de e-fuels mediante energía renovable es el régimen de operación en continuo sin la variabilidad a la que las fuentes de energía renovables están supeditadas.

Dependiendo del perfil operativo de la planta de producción de e-fuels, puede ser necesario un almacenamiento de hidrógeno. El almacenamiento de hidrógeno puede realizarse en cavernas subterráneas o en tanques (de acero), siendo este último potencialmente más adecuado para la producción de e-fuels debido a su versatilidad y amplia disponibilidad, pero, por contra, a un coste más elevado. La Tabla 10 enumera los costes de almacenamiento de hidrógeno identificados en la revisión bibliográfica.

Tabla 10. Costes de almacenamiento (€/kWh) de H₂ a corto plazo (5 - 10 años) y a largo plazo (20 - 30 años) (Albrecht & Nguyen, 2019) (Grahn et al., 2022) (Albrecht & Nguyen, 2019).

	A corto plazo (5 -10 años)	A largo plazo (20 – 30 años)
Almacenamiento en cavernas	2 - 3	0,8 – 1,5
Depósitos (de acero), incluidos compresores, instalación y mano de obra	45 - 57	21 - 27
Depósitos (de acero), sin compresores ni mano de obra	16	7,6

Proceso global de síntesis de e-fuels

En cuanto a la eficiencia global de la producción de e-fuels, está referida a la producción total dividida por las entradas totales. Las entradas pueden incluir el hidrógeno o la electricidad utilizada para la electrólisis, mientras que la salida se refiere al contenido energético del combustible final. En general, las eficiencias de los sistemas varían significativamente, influidas por la elección de las tecnologías y la eficiencia del componente clave: el electrolizador para la electrólisis del agua. La eficiencia global también es dependiente del estado del vector energético o del combustible, especialmente en el caso de los combustibles gaseosos a temperatura y presión estándar, ya que es necesaria energía adicional para la compresión y la licuefacción.

En el caso de los e-fuels F-T, con la tecnología existente, las eficiencias globales pueden llegar de 39 a 47 %, pero en el futuro podrían aumentar hasta el 53 %. La Agencia Danesa de la Energía informa de que la eficiencia global de las centrales de FT en la actualidad es del 37 %, que podría aumentar hasta el 55 % en 2050, mientras que otros autores estiman una eficiencia máxima del 51 % en 2050. Se prevé que las eficiencias futuras de electricidad-combustible sean del 49 % - 51 % para plantas de e-fuels (Grahn et al., 2022).

Para el e-metanol, se estima un potencial actual de eficiencia del 57 al 58 % a partir de biomasa y electricidad. La Agencia Danesa de la Energía, por su parte, calcula eficiencias globales del 58 % en 2020 y del 65 % en 2050 (IEA, 2023).

En cuanto al e-metano, se estima que la producción a través de la vía de gasificación e hidrogenación de biomasa podría alcanzar una eficiencia del sistema del 58 % - 59 %, mientras que el bio-e-metano producido a través de la metanación unida a la electrólisis podría alcanzar una eficiencia del 54 % en 2050. Por otro

lado, se prevé que el bio-e-metano generado por metanación, añadiendo hidrógeno a las instalaciones de producción de biogás puede alcanzar eficiencias del 82 % (IEA, 2023).

Para comparar los costes de producción de las distintas opciones de e-fuels de forma armonizada, se utilizan los costes de referencia a corto plazo (5 - 10 años) y a largo plazo (20 - 30 años) de los componentes clave de la fabricación de los e-fuels, los cuales se han indicado en la Figura 9 y descritos anteriormente.

Los precios de la electricidad juegan un papel decisivo en el costo de los e-fuels. Además, la variabilidad de las fuentes renovables para la producción de energía eléctrica juega un papel crítico, ya que influye directamente en el factor de carga de la producción de combustible y, por lo tanto, en la contribución que la inversión en la planta tiene en los costos del mismo. La combinación de precio y disponibilidad es, por lo tanto, una consideración clave, que también depende en gran medida de si los electrolizadores están conectados directamente a las energías renovables o a la red eléctrica.

El interés en conectar la producción de los e-fuels a las redes eléctricas ha sido motivado en parte por la mayor penetración de fuentes de energía renovable variables en los mercados eléctricos, lo que ha llevado a precios de energía bajos y ha creado demanda para servicios de equilibrio. Se ha previsto que los electrolizadores conectados a la red operen durante las horas de bajo precio del mercado eléctrico mayorista, convirtiendo la electricidad barata en combustibles de baja emisión (IEA, 2023).

Tabla 11. Costes armonizados (€/kWh) a corto plazo (5 – 10 años) y a largo plazo (20 - 30 años) de cada una de las etapas involucradas de los e-fuels.

Electrólisis	Unidad	A corto plazo (5 – 10 años)	A largo plazo (20 – 30 años)
CAPEX electrolizador (a corto plazo: media de AEL y PEMEL, a largo plazo: media de AEL, PEMEL y SOEL)	€/kW _{eléctricos}	900	500
OPEX (incluida la sustitución del stack de la pila)	% del CAPEX	4	4
Eficacia	H _{2,PCI} /entrada de electricidad	65 %	74 %
Demanda de agua (suponiendo una demanda estequiométrica 2X)	t/MWh	0,54	0,54
Coste del agua desionizada	€/t agua	1	1
Procesos de biocombustible	Unidad	A corto plazo (5 – 10 años)	A largo plazo (20 – 30 años)
Gasificación CAPEX (incluida la purificación del gas)	€/MW _{biomasa seca}	1250	1150
Eficacia de la conversión	GJ _{syngas} /GJ _{entrada biomasa}	77 %	83 %
Materia prima de biomasa	€/GJ _{biomasa}	7	7
CAPEX planta de biogás (digestión anaerobia)	€/MW _{biogás}	1900	1650
Materia prima del sustrato de biogás	€/GJ _{biogas sustrato}	1,2	1,2
Síntesis de combustible	Unidad	A corto plazo (5 – 10 años)	A largo plazo (20 – 30 años)

CAPEX reactor de síntesis y conversión eficiencia entre paréntesis			
Hidrógeno a metano	€/MW _{CH4}	450 (83 %)	250 (83 %)
Hidrógeno a metanol	€/MW _{MeOH}	700 (84 %)	300 (84 %)
Hidrógeno a DME	€/MW _{DME}	700 (81 %)	300 (81 %)
Metanol a gasolina	€/MW _{gasolina}	600 (88 %)	300 (88 %)
Hidrógeno a líquidos Fischer-Tropsch	€/MW _{combustibles}	1600 (66 %)	750 (66 %)
Síntesis de amoníaco (incluido ASU)	€/MW _{NH3}	1400 (79 %)	850 (79 %)
OPEX	% del CAPEX	4	4
Otros	Unidad	A corto plazo (5 – 10 años)	A largo plazo (20 – 30 años)
Coste de la captura de CO ₂ (fuente puntual)	€/t _{CO2}	50	25
Precio de la electricidad	€/MWh _{eléctricos}	50	50
Licuefacción de hidrógeno	€/kW _{combustible}	0,30	0,17
Otras inversiones (costes de instalación, costes imprevistos, etc.)	% del CAPEX	1,5	1,5
Factor de capacidad de los electrolizadores (sin almacenamiento de H ₂)	% del CAPEX	0,70	0,70
Tipo de interés	%	0,05	0,05
Vida útil del sistema	Años	25	25

Además del coste de la electricidad el otro factor más influyente, aunque en menor medida en los costes de producción es el CAPEX del electrolizador, tal y como se muestra en la Figura 16. Ambos factores de coste son inciertos, por lo que resulta de interés estudiar cómo afecta su variación al coste total. Los costes se estiman empleando las previsiones a largo plazo para el hidrógeno electrolítico licuado y el e-metanol para ejemplificar los impactos en los costes totales de producción. Además, dado que todos los e-fuels se ven afectados por el coste de producción del hidrógeno electrolítico, es decir, el precio de la electricidad, y el coste del electrolizador se pueden tomar como representativos (Grahm et al., 2022).

Los costes mostrados en la Tabla 11, son representados en la Figura 16, para la producción de e-metanol e hidrógeno electrolítico licuado, utilizando valores base a largo plazo, 20 – 30 años siendo los ingresos no incluidos en los costos de producción de combustible armonizados. Sin embargo, como ilustración, del posible impacto a tener en cuenta de los ingresos, se muestra la reducción de costes del potencial de venta del oxígeno de alta pureza a 50 €/tO₂.

Cuando se asume un precio de la electricidad para las estimaciones del coste de producción, hay que destacar el factor de capacidad (FC) de la instalación, es decir, la relación entre la producción real de la unidad frente a lo que es capaz de producir al máximo rendimiento y, además si existe la necesidad de almacenamiento de hidrógeno para permitir una producción estable de combustible mientras únicamente se utiliza la electricidad renovable (e intermitente) para la electrólisis.

Tomando como referencia el precio medio de la electricidad a lo largo de todo el año dejaría de ser relevante el cálculo del coste de producción de e-fuels, ya que dicho precio sería demasiado elevado, dado que enmascararía los picos de incorporación de la energía renovable la cual es de interés en la producción de e-fuels, donde los precios son más atractivos (Grahm et al., 2022).

Además, se prevé que los costes de la electricidad en el futuro sean más variables y diferentes a los actuales, tanto a corto plazo como, sobre todo, a largo plazo, a medida que las fuentes de electricidad renovables más fluctuantes, como la eólica y la solar, aporten en mayor medida a la generación de electricidad. Ocasionando, por tanto, que haya más horas con precios de la electricidad más bajos y más horas con precios más altos que en la actualidad. Por ende, utilizar los precios medios anuales actuales de la electricidad para estimar los futuros costes de producción no es una hipótesis adecuada (Grahn et al., 2022).

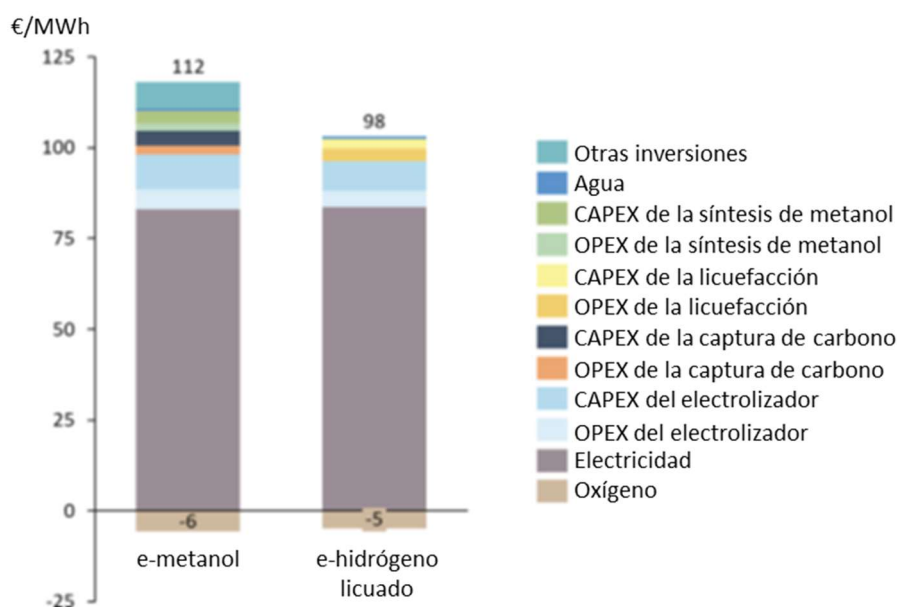


Figura 16. Costes de producción para e-metanol e hidrógeno electrolítico licuado mostrando los diferentes costos de componentes, utilizando valores base a largo plazo, 20 – 30 años. Adaptado (Grahn et al., 2022)..

En cuanto al impacto ambiental, al igual que sucede con los costes y la demanda de energía, este varía en función de la tecnología. El impacto ambiental más investigado es el cambio climático/calentamiento global, cuyos procesos de mayor contribución de emisiones son la producción de electricidad y del suministro de carbono (fuente de carbono y proceso de captura).

Los artículos revisados indican que el uso de los e-fuels sustituyen a los combustibles fósiles convencionales y, por tanto, se evalúa el ciclo de vida "de la cuna a la puerta" (o "cradle to gate") (Fernández-Dacosta et al., 2019) (Artz et al., 2018), ya que el resto de la tecnología utilizada sería idéntica. Esto corresponde hasta la etapa de síntesis de e-fuels (incluida) dentro del ciclo de vida de la producción de e-fuels que se muestra en la Figura 17. En consecuencia, el alcance de una evaluación ambiental resulta esencial para interpretar los resultados.

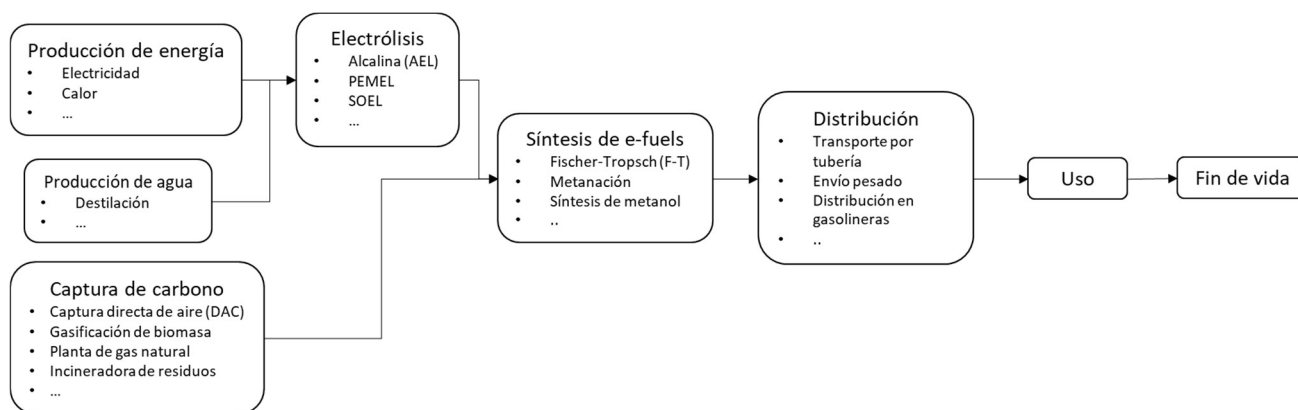


Figura 17. Ciclo de vida de la producción de e-fuels.

Dentro del ciclo de vida de los e-fuels es de gran relevancia el impacto de la fuente de electricidad y la fuente de CO₂ como materia prima en las emisiones de GEI. En la siguiente Figura 18, se muestra la comparativa de emisiones de CO₂ de distintos e-fuels en función de la fuente de energía empleada para su producción y su comparativa con las emisiones de combustibles fósiles. En ella, se observa la alta dependencia de la fuente de energía para su producción. En sistemas de mix energéticos predominantes de fuentes fósiles (como la red eléctrica de China) las emisiones de CO₂ son considerablemente superiores a su misma producción empleando fuentes de energías renovables. El empleo de energías renovables supone una disminución de entre un 75 a un 98 % de emisiones de GEI a las emisiones de los combustibles fósiles que sustituyen.

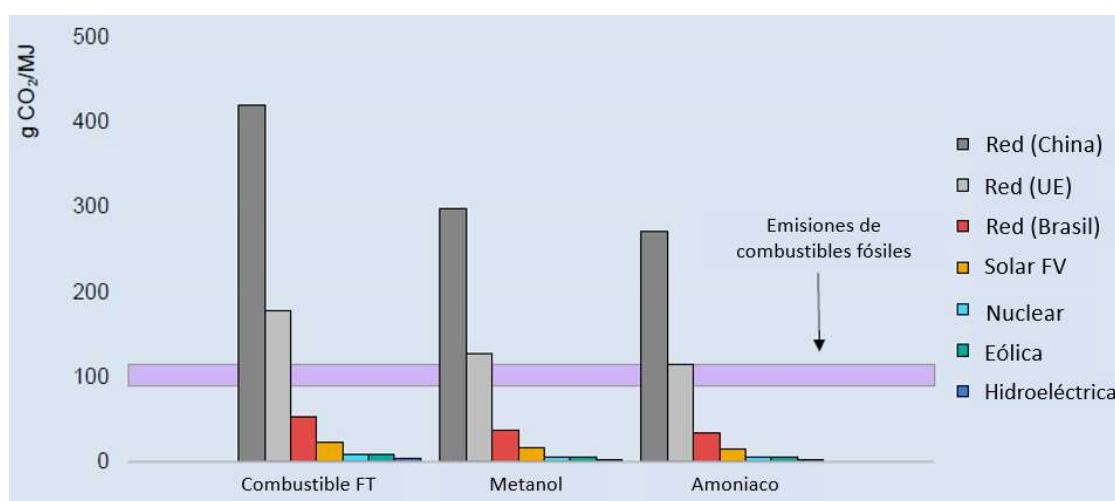


Figura 18. Emisiones de GEI relacionadas con la producción de e-fuels en función de la fuente energética empleada. Adaptado (IEA, 2023).

Se concluye, por tanto, que los distintos e-fuels tienen diferentes impactos ambientales en función de la procedencia de la electricidad utilizada y de su vía de síntesis. Ofreciendo reducciones de emisiones si se producen a partir de electricidad renovable con bajas emisiones de carbono, pero si la electricidad se produce utilizando fuentes de energía fósiles, las emisiones de GEI pueden llegar a ser más elevadas en comparación con los combustibles fósiles. Una combinación de redes energéticas con un alto grado de renovables es una herramienta para lograr reducciones de CO₂, pero la proporción de energía que debe proceder de electricidad baja en carbono varía según las fuentes consultadas. Además, existen estrategias

de optimización que integran el calor producido en el electrolizador con la producción de combustible para minimizar los requisitos energéticos (Bokinge et al., 2020). Este hecho conduce a reducir las emisiones de la producción de e-fuels.

En cuanto a la fuente de CO₂, en la revisión global del hidrógeno de la AIE (Helgeson & Peter, 2020) se concluye que para garantizar la neutralidad de CO₂ del combustible producido a largo plazo, los suministros de CO₂ deben capturarse en las plantas de conversión de bioenergía o directamente de la atmósfera (Schmidt et al., 2017), siendo el CO₂ biogénico y atmosférico como las fuentes más interesantes, aunque la utilización del CO₂ fósil puede ser beneficiosa en determinadas situaciones. Dado que, si se captura CO₂ de fuentes puntuales fósiles persistentes, el beneficio climático puede ser igual o incluso mejor que la captura directa de CO₂ atmosférico. Sin embargo, este no es el caso si la producción de e-fuels prolonga la vida útil de las fuentes puntuales, por ejemplo, aumentando su rentabilidad o provocando efectos de bloqueo tecnológico. La producción de e-fuels a partir de fuentes no sostenibles debe provocar efectos de retroalimentación, como la dependencia de los e-fuels de estas fuentes, cuando el cambio a otros combustibles tiene mayores beneficios climáticos.

Como se ha indicado, los e-fuels son válidos para la reducción de GEI teniendo en cuenta las etapas desde “la cuna a la puerta”. Sin embargo, si se tiene en consideración todo el ciclo de vida de los e-fuels (ver Figura 17), el impacto ambiental se ve aumentado dado que los e-fuels basados en carbono, utilizados en el sector del transporte, liberan el carbono de nuevo a la atmósfera cuando se queman en los motores de los vehículos.

Un aspecto importante a favor del uso de los e-fuels es la posibilidad de utilizar las infraestructuras existentes o, al menos, de modificarlas de forma limitada para su distribución y suministro.

En cuanto al fin de vida de los automóviles basados en e-fuels, dado que se basan en la misma tecnología de propulsión (motor de combustión) pero empleando combustibles alternativos, su fin de vida se rige mediante el Real Decreto 265/2021, de 13 de abril, sobre los vehículos al final de su vida útil. Cuyo procedimiento para la gestión de los vehículos al final de su vida útil (VfVU) sigue el esquema de la siguiente Figura 19.

El objetivo de esta legislación es el establecimiento de medidas destinadas a la prevención de la generación de los residuos, la reutilización, el reciclado y, en última instancia, las distintas formas de valorización con el fin de evitar el vertido. El planteamiento, contempla los componentes que componen el vehículo para así, reducir la eliminación de residuos y mejorar la eficacia en la protección de la salud humana y del medio ambiente.



Figura 19. Esquema de tratamiento de VFVU (MITECO, s.f.).

Por otro lado, por parte de la Unión Europea se han establecido diversas medidas para incentivar el desarrollo de los e-fuels mediante la creación de objetivos específicos del año 2023 al 2030 a través de la legislación “ReFuelEU Aviation” y “FuelEU Maritime”. La primera de ellas, hace referencia al sector de la aviación, estableciendo una cuota mínima del 0,7 % en 2030-2031 y una cuota media del 1,2 % de e-fuels de bajas emisiones durante ese período. El objetivo aumenta progresivamente hasta el 35 % para 2050, mientras que la segunda propuesta, referida al sector marítimo, establece una cuota del 2 % de e-fuels de bajas emisiones para 2034 (IEA, 2023).

Los e-fuels también pueden competir con otras opciones para cumplir los requisitos de la Directiva de Energías Renovables. Dentro de Europa, Alemania ha establecido un objetivo del 2 % del combustible sostenible para la aviación de e-queroseno de bajas emisiones para 2030. En Brasil, el Programa Combustible del Futuro incluye un objetivo de reducción del 1 % de GEI para la aviación para el año 2027. A partir de 2023, Brasil era la única economía emergente con políticas de combustible de transporte de bajas emisiones que permiten los e-fuels. Otros países como Estados Unidos, India, la Unión Europea, Japón y Canadá han incorporado los e-fuels en sus estrategias y hojas de ruta de hidrógeno para impulsar la investigación y el desarrollo. Sin embargo, a nivel mundial, los e-fuels no se están expandiendo a un ritmo coherente con las ambiciones del escenario de cero emisiones netas (IEA, 2023).

7. Vehículos Eléctricos De Baterías

En los últimos tiempos, las baterías han adquirido una gran importancia en el ámbito de la movilidad, sobre todo en el contexto de los vehículos eléctricos de baterías (BEV, por sus siglas en inglés, "Battery Electric Vehicle") (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024). El término "vehículo eléctrico" engloba cualquier vehículo de propulsión eléctrica, incluidos coches, bicicletas eléctricas, motocicletas y otros vehículos impulsados por baterías. Dentro de esta categoría destacan principalmente los vehículos eléctricos híbridos (HEV, por sus siglas en inglés, "Hybrid Electric Vehicles"), vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV, "Plug-in Hybrid Electric Vehicles") y vehículos eléctricos de batería (BEV) (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024). En el presente trabajo se focaliza el estudio en los vehículos eléctricos de baterías.

La configuración general de los vehículos eléctricos de batería (BEV) se muestra en la Figura 20, los cuales constan principalmente de un motor de eléctrico alimentado por baterías que sustituyen al motor de combustión interna (ICE). El BEV, por tanto, es un vehículo libre de emisiones de GEI durante su uso. Sin embargo, la lenta carga de la batería y el costoso almacenamiento de la electricidad limitan la amplia disponibilidad de estos en la actualidad (Wang et al., 2020) (Ghosh, 2020).

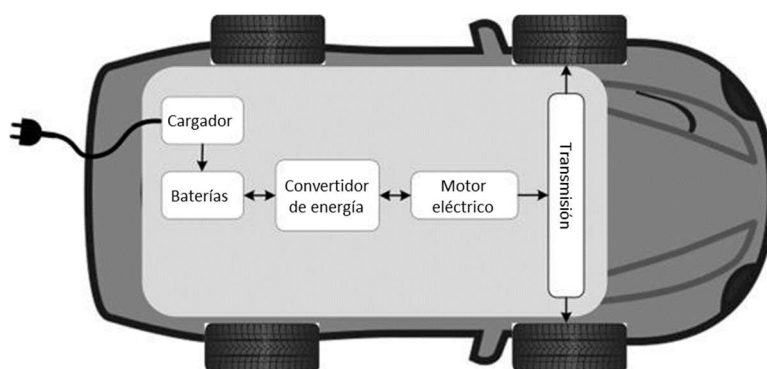


Figura 20. Configuración típica del sistema de propulsión de BEV (Yong et al., 2015).

A diferencia de los vehículos convencionales con motor de combustión interna, que utilizan combustibles para alimentar el motor y generar energía, los BEV utilizan baterías para almacenar energía eléctrica y propulsar el vehículo mediante un motor eléctrico. Las baterías suelen dividirse en dos categorías: primarias y secundarias (Zhao et al., 2021). Las baterías primarias están diseñadas para un solo uso y no pueden recargarse. Por el contrario, las baterías secundarias son recargables y, por lo tanto, permiten ser usadas más de una vez. Las baterías empleadas en los vehículos eléctricos y en diversos modos de transporte pertenecen a la categoría secundaria. Estas abarcan diversos tipos de baterías como las de iones de litio, que son ampliamente utilizadas junto con otras de composiciones avanzadas. El uso de baterías en el transporte ofrece varias ventajas frente a los motores de combustión interna convencionales, como la reducción de emisiones, la menor dependencia de los combustibles fósiles y una mayor eficiencia. Sin embargo, la aplicación de las baterías también plantea ciertos retos, como la necesidad de infraestructuras de recarga y la actual autonomía limitada de estos en comparación con sus homólogos tradicionales (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024).

El principio de funcionamiento de una batería se basa en convertir la energía química en energía eléctrica, generando un flujo de electrones. Por un lado, el ánodo asume el papel de electrodo donde tiene lugar la

oxidación, que implica la cesión de electrones, lo que da lugar a la formación de iones cargados positivamente. Por otro lado, el cátodo funciona como el electrodo donde se produce la reducción, que comprende la ganancia de electrones y la consiguiente formación de iones con carga negativa. Al conectar el ánodo y el cátodo mediante un circuito externo, los electrones inician el movimiento, dando lugar a una corriente eléctrica. El electrolito asume el papel de medio que alberga iones capaces de migrar entre el ánodo y el cátodo. Su propósito es mantener el equilibrio de carga facilitando el movimiento de los iones (Chian et al., 2019). Existen otras tecnologías de almacenamiento de energía, aparte del almacenamiento en baterías, como supercondensadores o celdas de combustibles, en la siguiente Tabla 12, se muestran las características de estas tecnologías. Sin embargo, en el presente documento se centra la investigación en los vehículos eléctricos de baterías.

Tabla 12. Comparativa de las características de distintos tipos de almacenamiento de energía.

Características	Supercondensadores (Capacitores Electroquímicos)	Baterías	Celdas de Combustible
Temperatura operativa (°C)	-40 a 85	-20 a 65	25 a 1000
Peso (kg)	0,001 - 2	0,001 - 10	0,02 - 10
Potencial de celda operativo (V)	2,3 - 2,75	1,25 - 4,2	0,6 - 1,0
Capacitancia (F)	0,1 - 2	-	-
Tiempo de carga/descarga	Milisegundos - segundos	1 - 12 h	1 - 300 h
Densidad de potencia (kW/kg)	10 - 100	0,005 - 0,4	0,001 - 0,1
Densidad de energía (Wh/kg)	1 - 5	5 - 600	300 - 3000
Vida útil	30.000 h	150 - 1500 ciclos	1500 - 10.000 h

Los principales tipos de baterías utilizados en los vehículos eléctricos a batería (BEV) son las de níquel-hidruro metálico (NiMH) y las de iones de litio (Li-ion). Las baterías de iones de litio son las preferidas en los BEV por su mayor densidad energética en comparación con las baterías de NiMH, lo que significa una mayor capacidad para almacenar energía en un peso y volumen determinados. Además, presentan una mayor eficiencia, una vida útil más larga y unas capacidades de recarga más rápidas. Sin embargo, las baterías de NiMH conservan ciertas ventajas sobre sus homólogas de iones de litio, como ser más rentables y presentar una mejor tolerancia a la sobrecarga y la sobredescarga (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024).

Entrando en mayor detalle, las baterías de níquel-metal hidruro (NiMH) destacan principalmente en la adaptabilidad en el diseño, los mínimos requisitos de mantenimiento, altas densidades de potencia y energía, así como en la rentabilidad y seguridad. Desde el punto de vista de la fabricación, su estabilidad química las hace menos propensas a daños por calentamiento excesivo.

El costo de las baterías NiMH puede variar según su capacidad, siendo generalmente más económicas que las de iones de litio. Estas baterías están compuestas por un ánodo de aleaciones absorbentes de hidrógeno, un cátodo de hidróxido de níquel y un electrolito de hidróxido de potasio. Durante la carga, se generan iones H⁺ en el ánodo que se desplazan hacia el cátodo, reaccionando y liberando electrones, proceso que se invierte durante la descarga (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024).

Las baterías NiMH presentan una mejor tolerancia a la sobrecarga y descarga profunda, además de ser más ecológicas al no contener metales pesados tóxicos. Sin embargo, tienen una menor densidad energética y una tasa de autodescarga más alta en comparación con las baterías de iones de litio.

Con respecto a las baterías de iones de litio, estas ofrecen varias ventajas, como alta densidad de energía, larga vida útil y baja tasa de autodescarga. Sin embargo, presentan desventajas como costos de fabricación más altos y riesgos de seguridad por sobrecalentamiento o ignición si se manejan incorrectamente. En la Figura 21, se muestra la representación de las diferencias de densidades energéticas volumétricas y gravimétricas de las distintos tipos de baterías.

A pesar de su capacidad superior de almacenamiento de energía comparada con las baterías NiMH, las baterías de iones de litio enfrentan inconvenientes significativos como costos elevados, rangos de temperatura operativa limitados, dependencia de recursos limitados como el litio, implicaciones ambientales adversas y preocupaciones de seguridad. En cuanto a los electrodos, el ánodo, generalmente fabricado en grafito y, el cátodo de un óxido de metal de litio, comúnmente óxido de cobalto de litio (LiCoO₂). Durante la carga, los iones de litio se mueven desde el cátodo al ánodo a través de un electrolito basado en solvente orgánico. Al descargar, los iones de litio regresan al cátodo, generando así la corriente eléctrica (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024).

En la siguiente Tabla 13, se indican las características de los tipos más comunes de baterías, incluyendo sus electrodos, electrolitos y las reacciones químicas involucradas en su funcionamiento.

Tabla 13. Resumen de las características de varios tipos comunes de baterías.

Tipo de batería	Electrodos	Electrolito	Reacción
Plomo-ácido	Ánodo: Dióxido de plomo (PbO ₂) Cátodo: Plomo (Pb)	Ácido sulfúrico diluido (H ₂ SO ₄)	Ánodo: $PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O$
			Cátodo: $Pb + SO_4^{2-} \rightarrow PbSO_4 + 2e^-$
			General: $PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 \rightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$
Níquel-Cadmio (Ni-Cd)	Ánodo: Hidróxido de óxido de níquel (NiOOH) Cátodo: Cadmio (Cd)	Hidróxido de potasio (KOH)	Ánodo: $NiOOH + H_2O + e^- \rightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$
			Cátodo: $Cd + 2OH^- \rightarrow Cd(OH)_2 + 2e^-$
			General: $NiOOH + Cd + 2H_2O \rightarrow Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2$
Níquel-Hidruro Metálico (NiMH)	Ánodo: Óxido de níquel (NiO) Cátodo: Aleación absorbente de hidrógeno (M)	Hidróxido de potasio (KOH)	Ánodo: $NiO(OH) + H_2O + e^- \rightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$
			Cátodo: $MH + OH^- \rightarrow M + H_2O + e^-$
			General: $NiO(OH) + MH \rightarrow Ni(OH)_2 + M$
Iones de Litio (Li-ion)	Ánodo: Grafito Cátodo: Óxido de litio y cobalto (LiCoO ₂)	Disolvente de carbonato orgánico con sal de litio	Ánodo: $LiC_6 \rightarrow 6C + Li^+ + e^-$
			Cátodo: LiCoO ₂ + Li ⁺ + e ⁻ → LiCoO ₂ (Li _{1-x} CoO ₂)
			General: $LiC_6 + Li_{1-x}CoO_2 \rightarrow C_6Li_{1-x} + LiCoO_2$
Polímero de Litio (Li-Po)	Ánodo: Carbono litiado Cátodo: Óxido de cobalto litiado (LiCoO ₂)	Electrolito polimérico	Ánodo: $C_6H_4Li + 6Li^+ + 6e^- \rightarrow 6C + 7Li$
			Cátodo:

			$\text{LiCoO}_2 + \text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{LiCoO}_2 (\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2)$
			General: $\text{C}_6\text{H}_6\text{Li} + \text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 \rightarrow 6\text{C} + 7\text{Li} + \text{LiCoO}_2$

En la siguiente Tabla 14, se muestran las especificaciones de cada uno de los tipos de baterías.

Tabla 14. Comparación de las características y especificaciones de diversas tecnologías de baterías.

Especificaciones	Plomo ácido	NiCd	NiMH	Li-ion cobalto	Li-ion manganeso	Li-ion fosfato
Densidad específica de energía (Wh/kg)	30 - 50	45 - 80	60 - 120	150 - 190	100 - 135	90 - 120
Resistencia interna (mΩ)	< 100	100 - 200	200 - 300	25 - 75	25 - 50	25 - 50
Ciclo de vida (80 % de descarga)	200 - 300	1000	300 - 500	500 - 1000	500 - 1000	1000 - 2000
Tiempo de carga rápida	8 - 16 h	~ 1h	2 - 4 h	2 - 4 h	≥ 1 h	≥ 1 h
Autodescarga/mes (Temperatura ambiente)	5 %	20 %	30 %	< 10 %	-	-
Tensión de la célula (nominal)	2 V	1,2 V	3,6 V	3,8 V	3,8 V	3,3 V
Tensión de corte de carga (V/célula)	2,40	Flotante	2,25	3,60	4,20	-
Tensión de corte de descarga (V/célula, 1 C)	1,75	1,00	2,50 - 3,00	2,80	-	-
Corriente de carga máxima	5 C	0,2 C	20 C	1 C	0,5 C	1 C
Temperatura de carga	-20 a 50 °C	0 - 45 °C	0 - 45 °C	-20 a 60 °C	-	-
Temperatura de descarga	-20 a 50 °C	-20 a 65 °C	-20 a 60 °C	-	-	-
Requisitos de mantenimiento	3 - 6 meses	30 - 60 días	60 - 90 días	No hay	-	-
Requisitos de seguridad	Térmicamente estable	Térmicamente estable	Circuito de protección obligatoria	-	-	-
En uso desde (años)	Finales de 1800	1950	1990	1991	1996	1999
Toxicidad	Muy alta	Muy alta	Baja	Baja	-	-

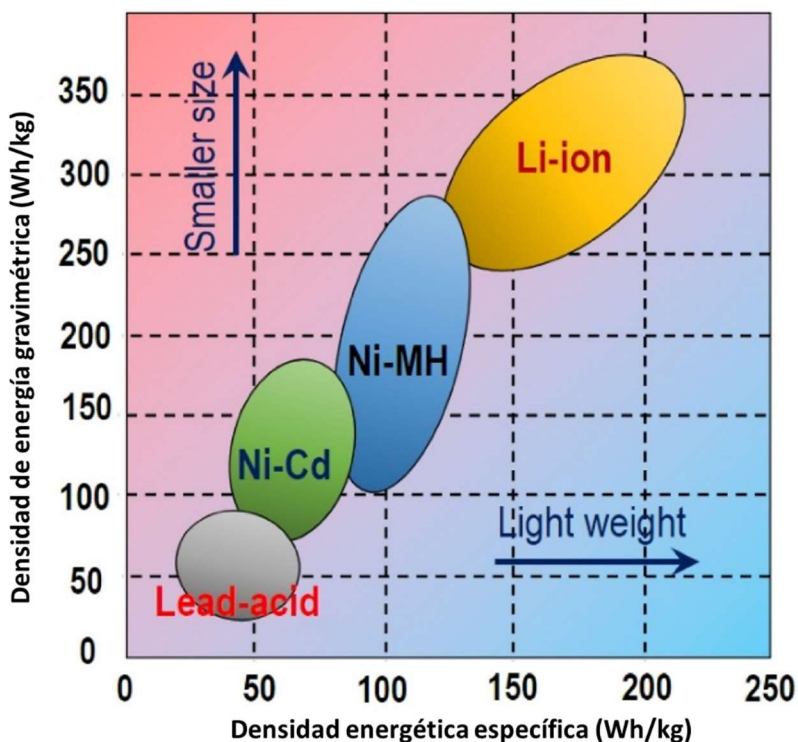


Figura 21. Representación visual de las densidades de energía volumétrica y gravimétrica de distintos tipos de tecnologías de baterías. Adaptado: (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024)

Según Bloomberg New Energy Finance (BNEF), la densidad energética de las celdas de las baterías casi se ha triplicado desde 2010, pasando de poco más de 100 Wh/kg a unos 300 Wh/kg (CleanTechnica, 2020) (ver Figura 22).

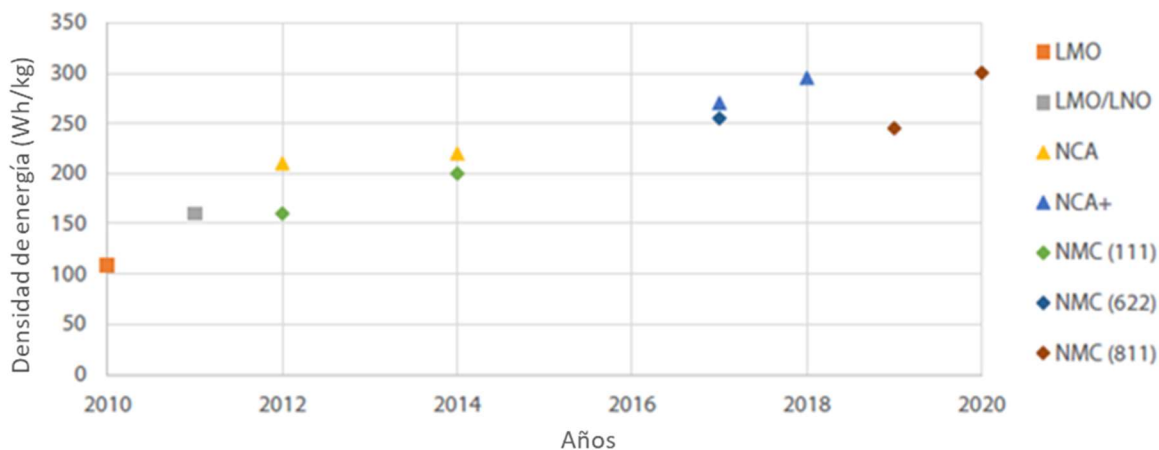


Figura 22. Evolución de la densidad energética de las baterías desde 2010 hasta 2020, según BNEF. Adaptado (Ricardo, 2023)

Las baterías de litio se suelen dividir en categorías según los elementos utilizados en sus cátodos. Las categorías más comunes que se utilizan en los BEV modernos incluyen:

- Litio-níquel-cobalto-óxido de aluminio (NCA)
- Óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC)

- Ion-fosfato de litio (LFP)
- Óxido de litio-manganeso (LMO)

Las baterías tipo NCA y NMC son las más empleadas actualmente en los vehículos eléctricos (aunque los LFP se están popularizando últimamente debido al menor coste de los materiales). Ambas ofrecen ciclos de vida largos (1000-2000 ciclos) (AIE, 2021), pero varían en términos de densidad de energía gravimétrica, que normalmente ha oscilado entre 200 y 250 Wh/kg para las NCA, y entre 140 y 200 Wh/kg para las NMC. Sin embargo, las formulaciones más recientes han alcanzado densidades energéticas aún mayores (ver Figura 22). Las baterías basadas en NMC son actualmente las más dominantes en los BEV, ya que su vida útil es mayor que la de cualquier otra solución actualmente en el mercado. Las tipo NMC vienen en diferentes formulaciones, dependiendo de las proporciones específicas de Níquel:Manganeso:Cobalto con esfuerzos en curso para reducir la cantidad de cobalto porque de coste, disponibilidad y aspectos medioambientales y sociales.

Las baterías LFP se han utilizado anteriormente con más frecuencia en vehículos pesados; sin embargo, esta tecnología ha visto un mayor uso también en ciertos modelos de turismos (particularmente en China) en los últimos años. Para poner esto en contexto, Volkswagen, ha planeado incluir la tecnología LFP en sus modelos básicos (AIE, 2021). La excelente estabilidad térmica de los LFP, así como la combinación de alta resistencia con menores costes por kWh los han hecho más atractivos desde el punto de vista de los costes, más seguros y sencillos de utilizar en tareas en las que el tamaño y el peso no son tan importantes. Además, la presencia de cobalto o níquel (ambas materias primas críticas) los convierte en una opción competitiva para el futuro próximo.

También se han introducido otras mejoras técnicas en los BEV, como la reducción de la masa total, el aumento de la autonomía eléctrica y la recarga más rápida, que también influyen en su comportamiento medioambiental general.

Por último, el efecto de la infraestructura de recarga de los BEV en la red eléctrica global es también una consideración importante en relación con la integración global de los sectores de la energía y el transporte. En particular, las baterías de los vehículos eléctricos pueden desempeñar un papel importante en el equilibrio de la red y en el uso eficiente de las energías renovables a través de tecnologías de vehículo a red o de la aplicación de baterías de segunda vida para el almacenamiento a corto plazo (Ricardo, 2023).

Por todo ello, los vehículos eléctricos de baterías (BEV), en la actualidad, se están generalizando y alcanzando el estatus de corriente principal en Europa en términos de volumen de ventas y aceptación por parte del público: en 2021, y según la Agencia Europea de Medio Ambiente, el 6 % de los coches nuevos vendidos en la Unión Europea han sido BEV (AEMA, 2022). En la Figura 23, se muestra la evolución de ventas de coches eléctricos en la UE a lo largo de los años. Un factor clave para lograr la mayor implantación ha sido el desarrollo de la tecnología de las baterías que hacen referencia al aumento de la densidad energética gravimétrica (en Wh/kg) y reducción del coste por kWh, así como las mejoras en la eficiencia/escala de fabricación provocando el aumento en cuanto nuevas matriculaciones de vehículos eléctricos (Ricardo, 2023).

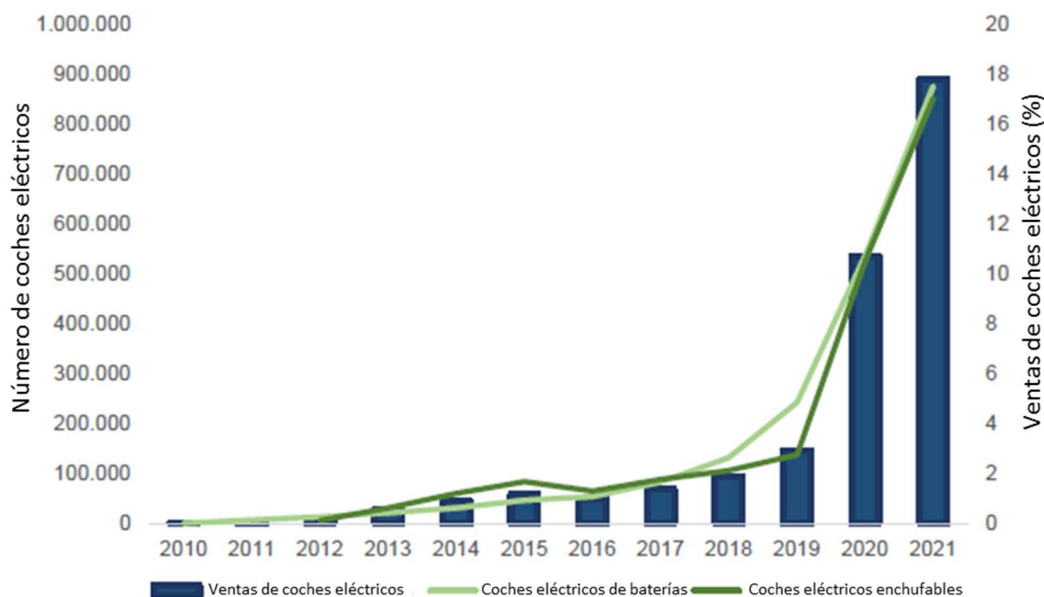


Figura 23. Nuevas matriculaciones de coches eléctricos en la UE (Ricardo, 2023).

Estas mejoras han suscitado el aumento de la autonomía de los vehículos eléctricos de batería en los últimos años. En la Figura 24, se muestra el avance de la autonomía (en millas) de los vehículos eléctricos de baterías en Estados Unidos desde los años 2013 a 2020, donde se muestra un aumento de autonomía en términos medios de 124 millas (200 km) en 7 años.

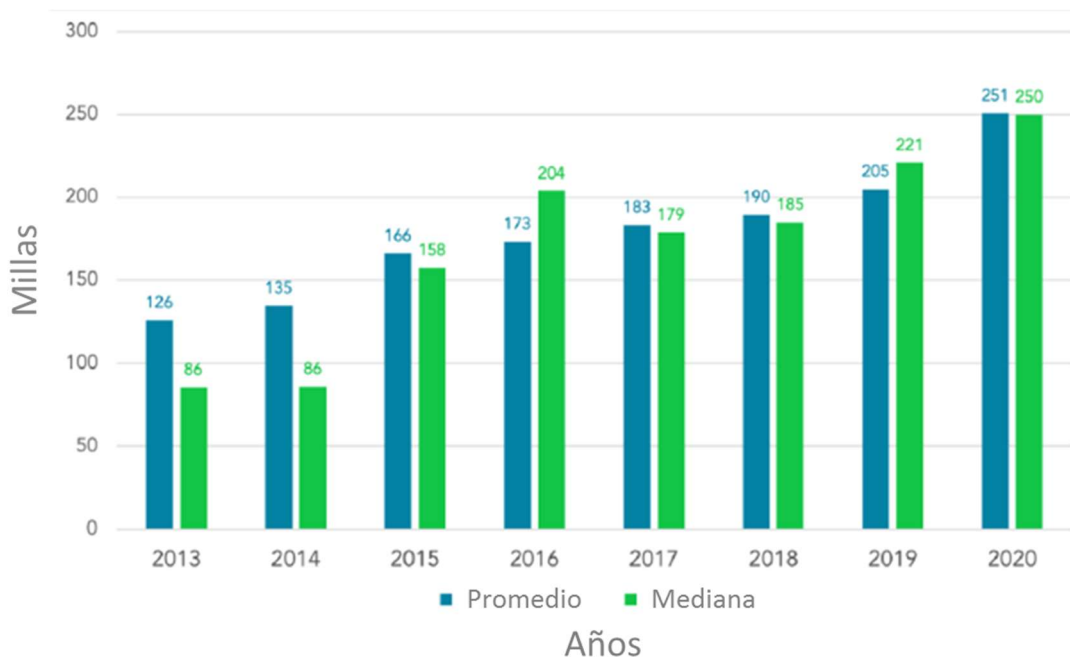


Figura 24. Rango medio y mediano de la autonomía (en millas) de los vehículos eléctricos de batería (BEVs) disponibles en EE. UU. de 2013 a 2020 (Conway et al., 2021).

A pesar de que las baterías de iones de litio son ampliamente utilizadas y aunque han sufrido mejoras, la química fundamental en la que se basa no ha evolucionado acorde a su expectativa. Por ello, existe una necesidad de desarrollar soluciones innovadoras para mejorar el rendimiento general de las baterías. La investigación y el desarrollo actual se centra en encontrar nuevos materiales que superen a los actuales en

términos de durabilidad y rendimiento, especialmente reemplazando el ánodo (de grafito) y el cátodo (de óxido de cobalto de litio) (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024).

El grafito, tiene limitaciones en términos de densidad energética y capacidad, lo que ha llevado a la búsqueda de materiales alternativos como el silicio, el estaño y varios óxidos metálicos. El óxido de cobalto de litio, pese a su alta densidad energética, presenta desafíos de costo y seguridad. Se están explorando candidatos como el óxido de manganeso de litio, el fosfato de hierro y litio, y el óxido de níquel manganeso cobalto como reemplazos. Además de los materiales del electrodo, se investigan alternativas al electrolito común basado en carbonato de etileno y carbonato de dimetilo con una sal de litio, que puede descomponerse bajo condiciones oxidativas, afectando el rendimiento de la batería.

En cuanto a la capacidad de fabricación, se están realizando inversiones significativas, con proyecciones que indican una capacidad de 6,5 TWh para el año 2030. China se espera que mantenga la mayor parte del mercado, con Estados Unidos y Europa superando cada una, 1 TWh de capacidad. Estas regiones muestran preferencia por las químicas de níquel-manganeso-cobalto (NMC) y han introducido directrices para mejorar la seguridad en la adquisición de minerales críticos y establecer una cadena de suministro más sostenible.

Respecto a la situación en otros países, la capacidad de fabricación de baterías en India se prevé que aumente significativamente, con planes de alcanzar 145 GWh para 2030. Hungría se está convirtiendo en un destino favorito para los fabricantes de baterías chinas, con inversiones cercanas a los 10 mil millones de dólares. La Unión Europea ha aprobado planes para que todos los vehículos nuevos sean libres de emisiones para 2035, lo que acelerará la transición a vehículos eléctricos y tiene como objetivo satisfacer casi el 90 % de su demanda de baterías con fabricantes locales para 2030 (Shahzad & Iqbal Cheema, 2024).

En Estados Unidos, se han anunciado nuevas capacidades de gigafábricas, sumando 315 GWh adicionales para 2030. China continúa liderando en capacidad operativa y planificada, manteniéndose como el mayor mercado de vehículos eléctricos.

Se espera que la demanda de baterías de iones de litio por parte del sector automotriz aumente significativamente, potencialmente valorada en más de 60 mil millones de dólares para el año 2030. A pesar de los altos costos actuales, se proyecta una rápida reducción de precios, haciendo de estas baterías la opción más económica para el año 2030.

En este momento la producción de baterías está dominada por los fabricantes japoneses o coreanos, seguidos por los estadounidenses. El 80 % del mercado está copado por cinco grandes compañías: AESC, LG Chem, Panasonic/Sanyo, A123 y SB LiMotive. La experiencia que tienen los fabricantes asiáticos en el campo de la tecnología electroquímica está mucho más avanzada que la industria europea. Hay escasos lugares donde se fabriquen baterías en Europa, y siempre se realiza a pequeña escala: en Reino Unido y España opera AESC (alianza entre NEC, Nissan y Renault), en Francia Saft S.A. y en Alemania la unión LiTec (DaimlerAG y Evonik).

La competitividad europea en este campo pasa necesariamente por alianzas, restricciones a la importación en la UE y la ventaja de la proximidad del fabricante, permitiendo abaratar en gran medida los costes de transporte. En la Figura 25, se muestra la evolución del precio de las baterías a lo largo de años (desde 2010 a 2030). Las curvas superior e inferior corresponden a las estimaciones más pesimistas y optimistas, respectivamente. La curva central corresponde a la evolución más comedida (Sanz, 2015).

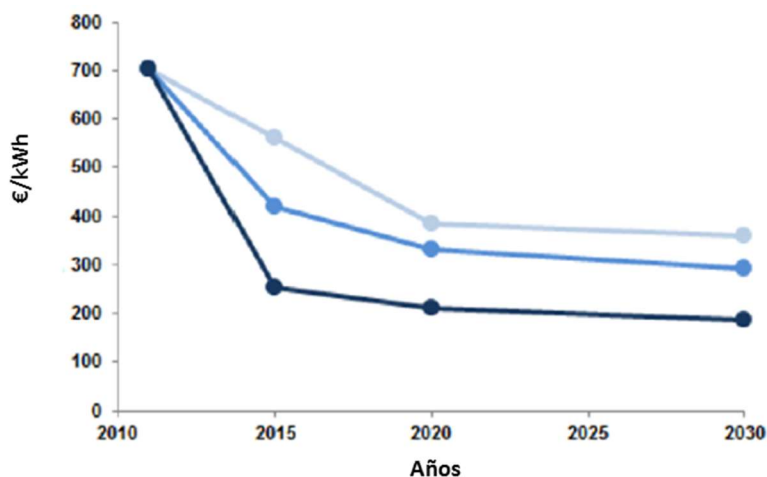


Figura 25. Evolución del precio de la fabricación de baterías en €/kWh (Sanz, 2015).

Por ello, teniendo en cuenta la estimación comedia, el precio medio actual para las batería es de 330 €/kWh (ver Tabla 15).

Tabla 15. Precio de las baterías en escenario medio (Sanz, 2015).

Año	2011	2015	2020	2030
Precio (€/kWh)	712	419	331	294

Dentro del sector de la automoción el uso de baterías de litio, tecnología predominante en vehículos eléctricos, suscita preocupación dada la escasez de litio. Sin embargo, estas contienen una cantidad relativamente pequeña de litio, aproximadamente el 1 % del peso total de una batería de iones de litio consiste en litio. Esto se traduce en aproximadamente 0,08 kg de litio utilizado por kWh de capacidad de almacenamiento, lo que resulta en 1 - 2 kg de litio por vehículo eléctrico de baterías. En la actualidad, el reciclaje de baterías de litio no es una realidad, debido a los importantes costes y demandas energéticas asociadas al proceso, así como los retos tecnológicos que supone dada la peligrosidad y toxicidad asociadas y la complejidad en la recuperación de los metales debido su baja proporción. Sin embargo, la escasez de litio en el futuro que provoque un alto precio del mismo traccionará su implementación (Shahzad y cols., 2023).

En cuanto a las reservas de litio, los principales yacimientos de este mineral se encuentran en Sudamérica (Chile, Bolivia, Argentina) y Asia (China) con reservas conocidas que ascienden a 20 millones de toneladas. Dada la proporción de litio presente en un vehículo eléctrico medio, y las reservas de mineral conocidas dedicadas íntegramente a la automoción, es posible abastecer a 2.500 millones de vehículos.

Como nuevo consumidor de electricidad, el vehículo eléctrico puede convertirse en un aliado del sistema eléctrico. Dado que una de las consecuencias de la inmersión de este tipo de vehículos en la red, puede ser la mejora de la eficiencia del sistema eléctrico, aplanando la curva de demanda (Sanz, 2015). En el caso de que los usuarios decidiesen recargar las baterías en los momentos de menor consumo (entre la una y las siete de la madrugada según el Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España) lograría aplanar la curva al disminuir las diferencias entre las horas punta y las de menor consumo eléctrico. Este es uno de los objetivos perseguidos. Por el contrario, en el caso de que la recarga se produjese sobre todo a las horas

punta, el impacto sobre la red sería muy perjudicial ya que, entre otros efectos negativos, se sobredimensionaría el sistema de transporte y generación.

Por otro lado, la introducción del vehículo eléctrico puede facilitar la integración de las energías renovables en el sistema con unas ciertas condiciones de seguridad. Esto es, al distribuirse más durante las horas del día la demanda de energía, se reducirían los casos en los que las energías renovables (como, por ejemplo, los parques eólicos) deben ser desconectadas ya que su producción puede exceder los límites admisibles por el sistema eléctrico. De esta manera, se convertiría en una gestión mucho más eficiente. Por ello, es evidente que la demanda de energía eléctrica aumentará (Sanz, 2015).

A continuación, se indica una estimación del nivel de aumento en la demanda en base a la tecnología actual.

Tomando como referencia que un BEV consume aproximadamente 0,15 kWh por cada km recorrido. En el caso de que recorriese 20.000 km/año, en un año necesitaría 3.000 kWh de energía eléctrica. Este valor es comparable al consumo medio de electricidad por hogar en España que es 3.487 kWh según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Suponiendo un parque móvil de un millón de vehículos eléctricos, su consumo total anual sería de 3 TWh (3.000 millones de kWh), dado que la producción anual de energía eléctrica en España en el año 2022 se situó en torno a los 276 TWh, de los cuales, el 22 % procedió de la energía eólica, las infraestructuras existentes cubrirían toda la demanda. Incluso, empleando la totalidad de la electricidad proveniente de la energía eólica, representa únicamente el 5 % de su consumo. Resultando, por tanto, viable el suministro de energía renovable para dicho fin.

Por ello, un aspecto fundamental a la hora de impulsar el vehículo eléctrico resulta de la infraestructura para la recarga de las baterías. Está en entredicho si el modelo actual es capaz de ofrecer suficientes puntos de suministro de energía para todos los vehículos. Respuestas claras a dichas cuestiones parecen necesarias para que finalmente se produzca el cambio en el modelo del transporte a nivel europeo.

Lo cierto es que los puntos de recarga presentan algunas ventajas frente a los de los convencionales vehículos de combustión interna. La principal es la existencia de unas redes eléctricas ya implantadas por todo el territorio europeo, por lo que se posibilita un abastecimiento de energía distribuido por toda la geografía. Esto se traduce en que la recarga no se produce únicamente en puntos específicos de la ciudad o la carretera (como ocurre con los vehículos convencionales con las gasolineras), sino que es posible en cualquier lugar donde exista conexión a red de electricidad. De esta manera, los propietarios de vehículos eléctricos pueden beneficiarse de la implantación de puntos de suministro de energía en vías públicas, parkings públicos de las ciudades e incluso en sus propios hogares. Existen sistemas convencionales, que requieren entre seis y ocho horas para una recarga completa de la batería (según el modelo) y la potencia de carga. La rapidez, a su vez, depende del tipo de corriente eléctrica (alterna o continua) por lo que se pueden obtener distintos niveles de potencia. Los puntos de recarga rápida siguen en desarrollo, y se calcula que en tan sólo diez minutos serían capaces de recuperar aproximadamente unos 60 kilómetros de autonomía. A su vez, es importante que exista variedad de equipos de distinta clase según la localización del punto de recarga. Además, para una mayor facilidad en cuanto a su uso es necesaria la estandarización de los conectores.

Otra cuestión relevante es el tramo horario en que se conecta a la red. Los gobiernos fomentan con bonificaciones las llamadas “horas valle”, momentos durante los cuales la demanda eléctrica es menor, en este caso durante la noche. Se trata, por tanto, de una manera de optimizar el cambio de modelo a través de un cambio en los hábitos y costumbres de sus usuarios. Disponer de un sistema de medida de energía eléctrica y de un sistema de pago fiable son otros aspectos a tener en cuenta. Cabe destacar que cada punto

de recarga en la vivienda cuesta de media alrededor de los 750 € (precio medio que ofrecen empresas como LuGEnerGy o Charging Box). Por ello, en términos de infraestructura y distribución para lograr la transición del sector del transporte, deben implantarse a escala global un sistema de recarga accesible y a un coste comedido.

Tras abordar las cuestiones energéticas, de suministro, consumo y recarga para los vehículos eléctricos de baterías (BEV), es esencial profundizar en el análisis de su impacto ambiental para obtener una perspectiva más completa. Aunque los BEV representan una solución prometedora para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones asociadas al transporte, su huella ambiental abarca más que el simple acto de su uso (conducción). Desde la extracción de materiales para las baterías, pasando por las fuentes de producción de la energía eléctrica que las alimenta hasta su fin de vida, contribuye al perfil ambiental global de los vehículos eléctricos. Este enfoque integral nos permite evaluar de manera más precisa su verdadero potencial para contribuir a un futuro sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

La ausencia de emisiones en el tubo de escape convierte al BEV en un candidato potencial para ayudar a cumplir los objetivos de reducción de GEI. Sin embargo, antes de clasificar a los BEV como vehículos de cero emisiones, hay que tener en cuenta la fabricación y tratamiento de las baterías, así como la intensidad de emisiones de carbono en la generación de electricidad.

Las emisiones asociadas a la producción de BEV, están dominadas por la fabricación de la batería del vehículo, la mayoría de los impactos están relacionados con las cantidades de materiales utilizados en las baterías, que, en primera aproximación, son proporcionales a la masa de la batería, no a su capacidad de almacenamiento de energía. Por lo tanto, en términos generales, las mejoras en la densidad energética de las baterías tienden a reducir directamente los impactos ambientales en la fabricación, por kWh de almacenamiento de energía de la batería. La mejora de la tecnología de las baterías también repercute en la fase operativa (a través de la reducción de la masa por unidad de almacenamiento de energía, mayor vida útil de la batería/mejora de la durabilidad) y en los aspectos relacionados con el final de la vida útil (reciclabilidad, potencial para aplicaciones de segunda vida, etc.).

Las cantidades de materiales utilizados en la fabricación de baterías tienen un impacto directo en las implicaciones medioambientales por kWh de almacenamiento de energía en baterías. Así, las mejoras en la densidad energética permiten emplear menores cantidades de minerales en su fabricación. Entre ellas, las más utilizadas como el óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio (NCA) y el óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC).

En términos generales, y dentro de la misma clase de tamaño de vehículo, las emisiones de GEI asociadas a las dos primeras fases del ciclo de vida del vehículo (es decir, el abastecimiento de materias primas y la producción del vehículo) tienden a ser más altas para los BEV que para los vehículos de combustión interna. Esto se debe, en su mayor parte, a las baterías, comparativamente más pesadas y que consumen más recursos, y que pueden ser responsables de hasta el 50 % de las emisiones totales de GEI de la producción de BEV (Ricardo, 2023).

A su vez, es de gran importancia, además de las emisiones de GEI, la consideración del uso de elementos críticos (por ejemplo, litio, cobalto, níquel, manganeso y cobre), los cuales se encuentran en mayor proporción en los BEV. Estos materiales se utilizan en los paquetes de baterías y tienden a conferir a la producción de estos vehículos un impacto medioambiental comparativamente mayor en comparación con

los ICEV. Entre estas categorías de impacto adicionales, el agotamiento de los recursos abióticos y la toxicidad humana y ecológica son de importancia.

Tal y como se ha indicado, actualmente se utilizan tres tipos principales de tecnologías de baterías de iones de litio (LIB) en los BEV de pasajeros (LFP, NMC y NCA), y todas ellas varían significativamente en términos de densidad energética gravimétrica (Wh/kg) e impactos de producción (kg CO₂-eq/kg), con consecuencias obvias sobre los impactos de producción de los vehículos que las utilizan.

Otro factor que puede afectar significativamente a los impactos de la producción de vehículos es la ubicación de las plantas de fabricación (tanto para el propio vehículo como para la batería, cuando ambas ubicaciones son distintas). Esto se debe al papel comparativamente importante que desempeñan los consumos eléctricos en la fabricación y a la gran variabilidad en la composición de la combinación de redes en los distintos países.

Los resultados armonizados globales de las emisiones de GEI del ciclo de vida de los vehículos ligeros BEV de pasajeros (incluidas la producción y el uso de los vehículos) en comparación con sus homólogos de combustión interna (diésel y gasolina, ICEV-D y ICEV-G, respectivamente) se presentan en la Figura 26, donde, el eje de abscisas corresponde a la evolución con el tiempo y el eje de ordenadas a los impactos ambientales en términos de emisiones de CO₂ equivalente por vehículo y kilómetro (kg CO₂-eq/vkm). Las principales conclusiones que se desprenden de estos resultados es el predominio de las emisiones de la fase de uso en relación con las demás fases del ciclo de vida. Las estimaciones de impacto para los futuros BEV apuntan a márgenes significativos de reducción, lo que se debe principalmente a la supuesta mejora en la descarbonización de la mezcla de la red eléctrica (de media, los impactos de GEI en la fase de uso notificados para los futuros BEV son un 73 % inferiores a los de los actuales ICEV).

Los ICV (tanto de gasolina como diésel) se sitúan en el extremo superior de la gama de emisiones del ciclo de vida, a pesar de sus menores emisiones iniciales durante la fase de producción.

Los ICEV también se caracterizan por un margen muy limitado para futuras reducciones de emisiones, lo que se debe al hecho de que la eficiencia de conversión de los ICE ya se está acercando al límite de la termodinámica (ciclo de Carnot).

Por término medio, los BEV actuales presentan impactos de GEI en el ciclo de vida que son estadísticamente significativos inferiores a los de los ICEV (ver Figura 26). Las estimaciones de emisiones de los BEV para el futuro (hasta 2050) apuntan a nuevas reducciones significativas, lo que se debe a la descarbonización en curso de la combinación de la red eléctrica en la mayoría de los países.

Sin embargo, cabe mencionar que parte de la bibliografía también aborda otros tipos de impactos medioambientales, más allá de los impactos de las emisiones de GEI, que no se incluyen en esta armonización, pero que potencialmente podrían plantear algunas preocupaciones en términos de rendimiento medioambiental comparativo más amplio de los ICEV frente a los BEV. Entre ellos, los dos tipos de impacto más destacados están relacionados con el aumento de la demanda de materias primas críticas (CRM) (frente a los ICE convencionales) y, más concretamente, de metales para baterías como el litio, el cobalto y el níquel. De hecho, además de representar posibles cuellos de botella para la adopción generalizada de los BEV debido a meras limitaciones de disponibilidad, las cadenas de suministro de estas CRM son a menudo responsables de impactos no despreciables en términos de toxicidad ecológica y humana, así como de impactos sociales relacionados.

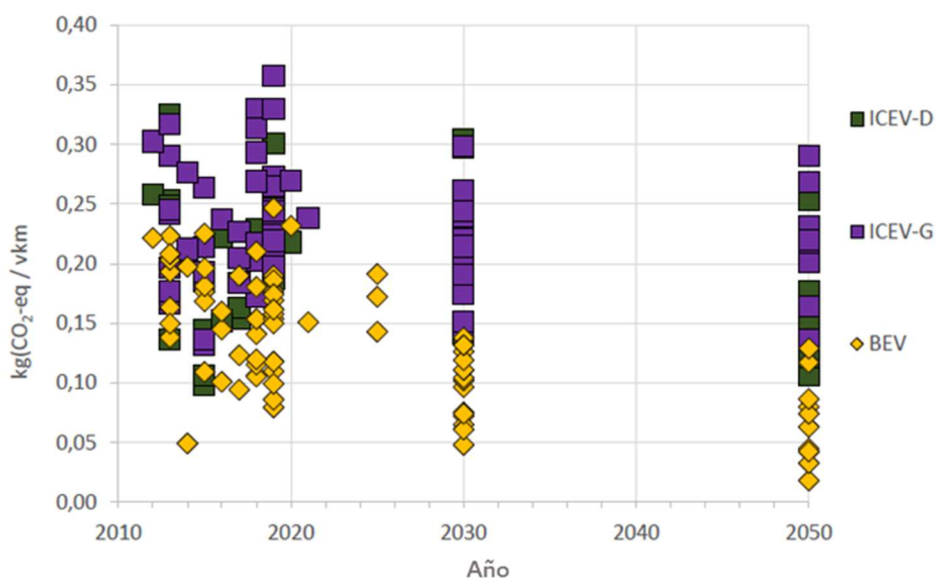


Figura 26. Impacto de GEI de los vehículos eléctricos de baterías (BEV) frente a los vehículos de combustión interna de gasolina (ICEV-G) y diésel (ICEV-D) (Ricardo, 2023).

Por último, respecto al fin de vida de las baterías, actualmente no existe un sistema estandarizado para la recuperación de los elementos valiosos (metales) presentes en ellas, esto se debe a la dificultad en cuanto a proceso de recuperación dada la baja proporción de estos materiales críticos presentes, así como a la peligrosidad y toxicidad asociadas junto con los altos costes. Por ello, su actual gestión deja mucho que desear en cuanto a la jerarquía de residuos se refiere. Se espera que, debido a la mayor demanda de estos elementos críticos, sumado a su menor disponibilidad de los mismos junto con la tracción que ejerzan los organismos gubernamentales en términos de legislación promuevan la implantación a gran escala de su reciclado.

La situación en cuanto al reciclaje de las baterías se ve aún más dificultado por la ausencia de productos normalizados en el mercado (en cuanto a las diversas modalidades de baterías existentes que presentan una gran variedad de composiciones y formatos), y por los riesgos que conlleva tanto para seguridad como la salud. En las Li-ion los electrodos están sumergidos en un electrolito formado por un disolvente orgánico y una sal de Li. Por una parte, los disolventes utilizados son muy inflamables y la mayoría de ellos contienen F, con el consiguiente riesgo de formación de fluoruro de hidrógeno (HF) en presencia de agua. Y por otra, el electrolito en sí es una sustancia nociva para la salud de las personas y el medio ambiente. De esta forma, un fallo interno, su exposición a altas temperaturas, daños mecánicos, etc. pueden hacer que se produzca una reacción en cadena exotérmica con el consiguiente riesgo de incendio o la salida del electrolito. El riesgo de fuga térmica es proporcional a la cantidad de energía que albergan las baterías.

Por ello, en lo que respecta al reciclaje de este tipo de residuos, todo lo anterior se traduce principalmente en la demanda de procesos cada vez más seguros y más eficientes, que permitan procesar mayores cantidades de residuos de Li-ion y recuperar materiales secundarios más puros que puedan ser reincorporados a la fabricación de nuevas baterías.

Por parte de las instituciones gubernamentales, en aras de impulsar la transición del sector de la automoción de los actuales vehículos ligeros hacia la movilidad de bajas emisiones del público general, han llevado a cabo diversas estrategias para incentivar la compra de vehículos eléctricos. Esto, sumado al creciente interés y

preocupación de la ciudadanía por los impactos ambientales y de salud que los vehículos de combustión son responsables, promueven el cambio social hacia la electrificación del sector.

Dentro de la legislación y ayudas impulsadas por el Gobierno estatal que su vez están influenciadas desde organismos europeos, destacan los conocidos Plan RENOVE y Plan MOVES, entre otros.

El Plan RENOVE, impulsado por el Ministerio de Industria y Turismo, se desarrolló en el año 2020 y fue destinado para la compra de vehículos nuevos a través de ayudas directas a los compradores. El Plan ofreció descuentos de diversa cantidad en función del tipo de vehículo a adquirir; siendo la cuantía de la ayuda desde 1.600 € para los vehículos diésel o de gasolina, 2.000 € para los coches híbridos y 5.000 € en el caso de vehículos eléctricos o híbridos enchufables con más de 40 km de autonomía.

El Plan MOVES, el cual se desarrolló en el año 2019 para el incentivo a la movilidad eficiente y sostenible, dio lugar al posterior Plan MOVES II y al actual Plan MOVES III, el cual comenzó en el año 2023 y finaliza en 2024 por iniciativa del Gobierno de España para el uso y la adopción de vehículos eléctricos y la infraestructura de recarga necesaria. Esta tercera edición del programa MOVES busca dar un impulso significativo a la transición hacia una movilidad más limpia y eficiente en el país.

Tabla 16. Ayudas referentes al programa MOVES III.

Tipo de vehículo	Ayuda pública posventa
<ul style="list-style-type: none"> Turismo enchufable (entre 30 y 90 km de autonomía) 100 % eléctrico con autonomía superior a 90 km 	<ul style="list-style-type: none"> Con achatarramiento 5.000 € / Sin achatarramiento 2.500 € Con achatarramiento 7.000 € / Sin achatarramiento 4.500 €

8. Conclusiones, Análisis y Discusión

Tras llevar a cabo el presente estudio se extraen las siguientes conclusiones.

Respecto al **estudio energético**, las baterías con las que actualmente se emplean los BEV se basan en la tecnología de ion-Litio, principalmente en Litio-níquel-cobalto-óxido de aluminio (NCA) y Óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC). Estas ofrecen ciclos de vida largos (1000 – 2000 ciclos) con una densidad de energía gravimétrica de aproximadamente entre 200 Wh/kg (tal y como se muestra en la Tabla 14 y Figura 21).

Los e-fuels, por su parte, en función del combustible, presenta diferentes eficiencias globales, desde 39-47 % para los e-fuels F-T actuales, con perspectivas de alcanzar el 55 % para el año 2050. Para el e-metanol, se estima un potencial actual de eficiencia del 57 - 58 % a partir de biomasa y electricidad y perspectivas futuras del 65 % en 2050.

En cuanto a la comparativa entre los BEV y los e-fuels, cabe destacar que la capacidad de almacenamiento energético de los e-fuels es considerablemente superior a la de las baterías (tanto en potencia como en duración), tal y como se muestra en la Figura 27.

Sin embargo, teniendo en cuenta toda la cadena desde el pozo a la rueda "WtW", es decir, la perspectiva global en términos de rendimientos por etapa, en la siguiente Figura 28, se muestran las eficacias de los diferentes procesos de conversión de energía, destacando la electrificación directa, referida a los BEV, así como a los procesos de "Power-to-liquid (diésel)" y "Power-to-liquid (gasolina)", a los e-fuels. En ella, se observa que la electrificación directa, posee la mayor eficiencia global, del 77 % actualmente y con perspectiva del 81 % para el año 2050. En cuanto a las tecnologías de e-fuels, estas debido a la pérdida de rendimiento de cada uno de los procesos involucrados, siendo la electrólisis, el más notorio, el rendimiento global, resulta cercano al 10 %. Por ello, desde el punto de vista energético, puede ser un aspecto lo suficientemente relevante para la decisión de una hoja ruta clara. Sin embargo, cabe destacar que cada tecnología debe estudiarse con perspectiva y considerar otros aspectos tales como el impacto ambiental y los costes de producción (que se discuten a continuación) así como otros factores tales como disponibilidad de materias primas, infraestructura, distribución etc.

A su vez, aunque el bajo rendimiento global de los procesos "PtL" se deben al rendimiento del electrolizador que está en constante investigación para el desarrollo de una mayor eficiencia, existen otras etapas involucradas que presentan bajos rendimientos y que comparten tecnología de propulsión con los vehículos convencionales, basados en la combustión interna. Estas se deben limitación termodinámica de los motores de combustión interna, que ronda una eficiencia de entorno al 30 %. Por ello, teniendo como referencia la eficacia global de los combustibles de origen fósil, partiendo desde el crudo, pasando por la producción de gasolina/diésel y, finalmente, la obtención de la energía a partir de estos combustibles, el rendimiento global, se encuentra en torno al 13 %, valor que no dista mucho con respecto a la eficiencia global de los e-fuels.

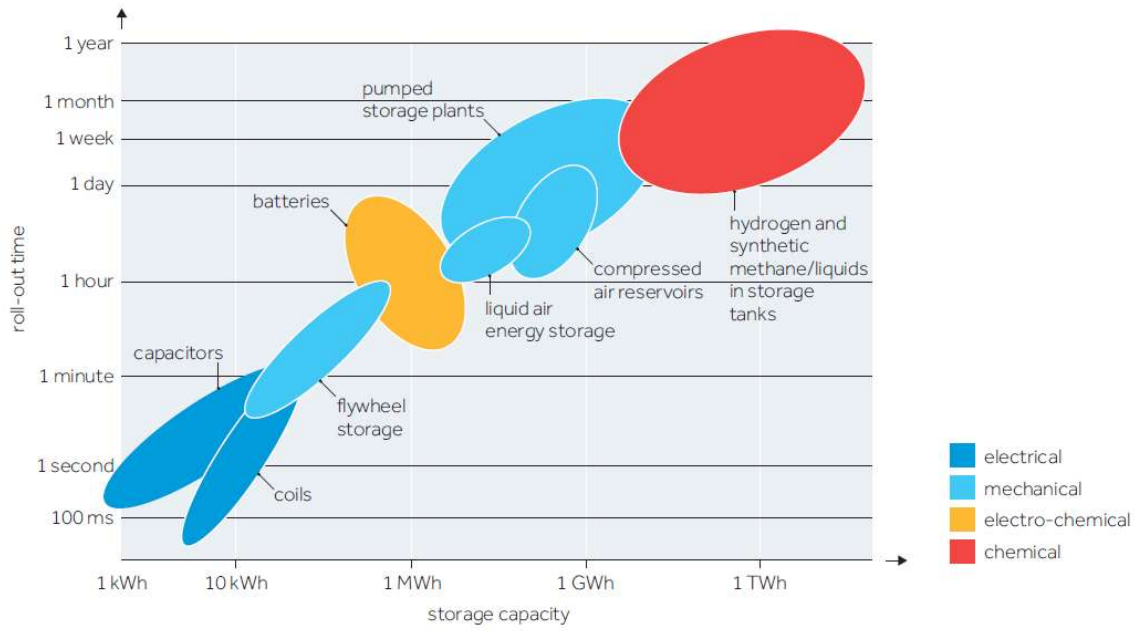


Figura 27. Diversas formas de almacenar e-fuels. (Soler, 2019).

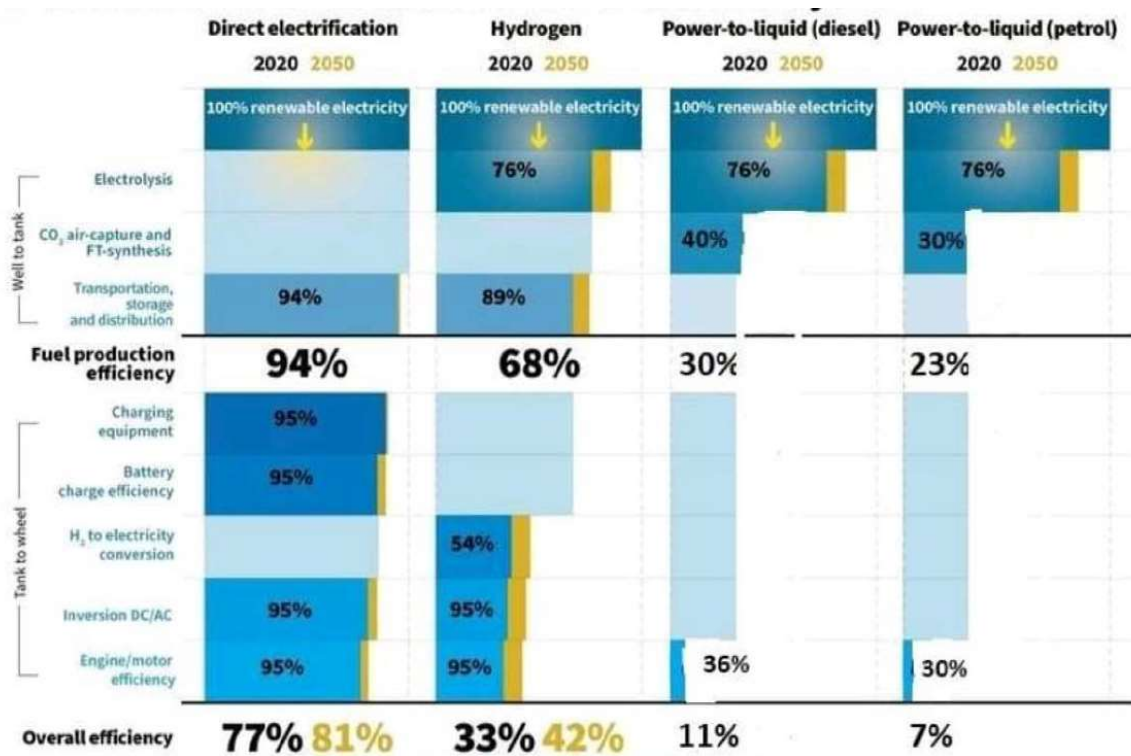


Figura 28. Eficiencias de los diferentes procesos de conversión de energía (Martin, 2023).

Con respecto al **estudio ambiental**, los BEV, tal y como muestra el análisis de ciclo de vida armonizado (ver Figura 26), la sustitución de los de vehículos eléctricos de baterías con respecto a los vehículos tradicionales de gasóleo y gasolina, permite la reducción en las emisiones de GEI (CO₂ eq.), por lo tanto, se trata de una estrategia útil para la descarbonización del sector.

Por otro lado, surge la problemática del fin de vida de la tecnología que, durante su uso, permite mitigar las emisiones de CO₂, como son las baterías. Estas, actualmente no tienen una gestión adecuada, sin embargo, una legislación acorde con las necesidades existentes que traccione al sector para su reciclaje, unido a un desarrollo tecnológico que brinde soluciones respecto a la reducción de metales críticos presentes en su composición, así como la reducción de la brecha tecnológica actual que permita su recuperación y reincorporación en la cadena de valor, facilitarán su implantación.

En cuanto a los e-fuels, la disminución del impacto ambiental mediante su implementación se encuentra en entredicho. Dado que si bien es cierto que la retirada del CO₂ de las fuentes de emisión (o directamente del aire) para su producción, supone a priori un beneficio ambiental, durante su uso es una fuente emisora de GEI. Esto es debido a que, aunque los GEI que los e-fuels emiten son compensados teóricamente mediante el uso de energía renovable y CO₂ proveniente de fuentes de emisión o del aire, el uso en los vehículos ligeros no son la aplicación idónea, debido principalmente a dos motivos, la distancia promedio que realiza un vehículo ligero y la ubicación de uso (lugares habitados).

Esto es, por un lado, dada la distancia diaria que recorre un usuario promedio (aproximadamente, de 45 km, 16.000 km/año, aunque varía en función del país) puede parecer razonable que la electrificación sea la vía para la descarbonización del sector, siempre y cuando existan los avances necesarios en términos de mejoras de infraestructura de recargas y autonomía, entre otras.

Y, por otro lado, dada la ubicación donde en términos generales se usan los vehículos, siendo vías interurbanas y urbanas, pobladas de habitantes, la emisión de GEI durante su uso, impacta negativamente de manera local, afectando a la salud de los seres humanos del entorno.

Por ello, los e-fuels pueden tener mayor beneficio dentro del sector transporte, en otros ámbitos tales como el marítimo o la aviación, donde la electrificación es más complicada y se dan las situaciones opuestas a las indicadas; es decir, requieren de grandes autonomías (largas distancias) y, por tanto, de mayores densidades energéticas, además de que su uso se encuentra alejado de las zonas habitadas.

Respecto al **estudio económico**, aunque históricamente los BEV han sido más costosos respecto a sus homólogos de combustión interna, los desarrollos tecnológicos han logrado disminuir el precio de las baterías, así como aumentar su autonomía (ver Figura 29 y Figura 24). Desde el año 2010 hasta el año 2019, se ha producido una disminución del precio de las baterías de casi el 87 %, y su tendencia en los próximos años es continuar con esta disminución.

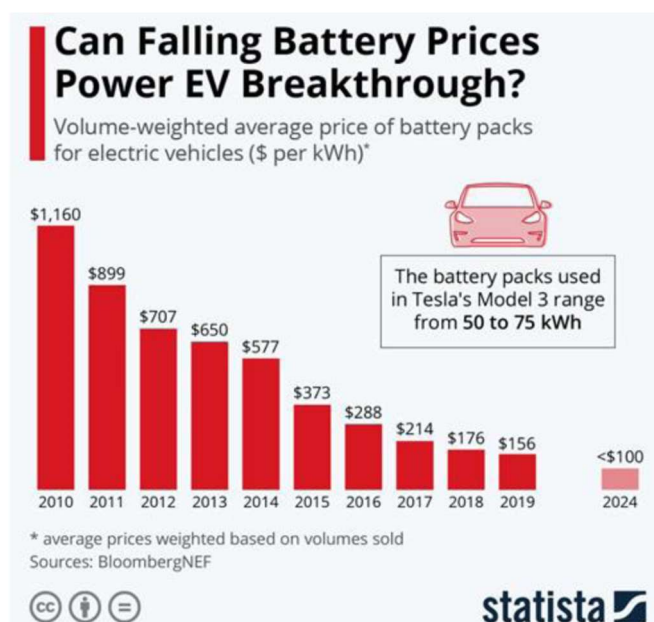


Figura 29. Evolución del precio de las baterías a lo largo del tiempo (Conway et al., 2021).

Sin embargo, existen otros costes asociados al BEV, como es el coste de la recarga. Este, varía en función de la potencia de la carga, que puede ser desde 0,38 €/kWh, hasta 0,79 €/kWh, con cargas de 50 kW y superiores a 220 kW, respectivamente.

A su vez, cabe destacar que actualmente existen ayudas económicas por parte de organismos estatales para la adquisición de vehículos eléctricos como los BEV que incentiven su compra, aunque posiblemente, estas ayudas no se mantengan de manera indefinida.

Con respecto a los e-fuels, en la Tabla 11 y Figura 16 se muestran los CAPEX y OPEX referentes a diversos tipos de e-fuels, los cuales son los términos que representan los costes en cuanto a inversión de capital y operativos, respectivamente. Los mayores costes asociados a los e-fuels son debido al coste de la electricidad durante su síntesis, referida principalmente, al consumo del electrolizador. En vistas a futuro, cabe esperar una disminución en cuanto al coste de la electricidad que, sumado al esperado aumento en cuanto a su eficacia, permita la disminución de los costes.

Los motores que operan con e-fuels generados a partir de electricidad renovable resultan prometedores para reducir las emisiones de CO₂ de TtW (“tanque a rueda”). Los e-fuels pueden contribuir a cerrar el ciclo del carbono mediante la síntesis de hidrógeno verde y CO₂ capturado en combustibles gaseosos/líquidos, lo que reduce intensivamente la emisión de CO₂ de TtW. El coste de los e-fuels en el año 2020 se estima de en torno a 3 € por litro de combustible. Siendo su coste en el año 2015 de 7 €/L. Se espera que este coste disminuya a 1 - 2 € por litro debido a la reducción del precio de la electricidad renovable, al efecto de la economía de escala y al desarrollo tecnológico. Sin embargo, este precio aún será de 1 a 3 veces más caro en comparación con el costo de los combustibles fósiles en el año 2050. Sumado, por tanto, el alto coste y la cantidad limitada de producción, se espera que la adopción de e-fuels sea principalmente en el sector de la aviación y el transporte marítimo, debido, además, principalmente por el hecho de que los e-fuels poseen una mayor densidad energética en comparación con las baterías (electricidad) y, por tanto, los hace más idóneos para estas vías de transporte.

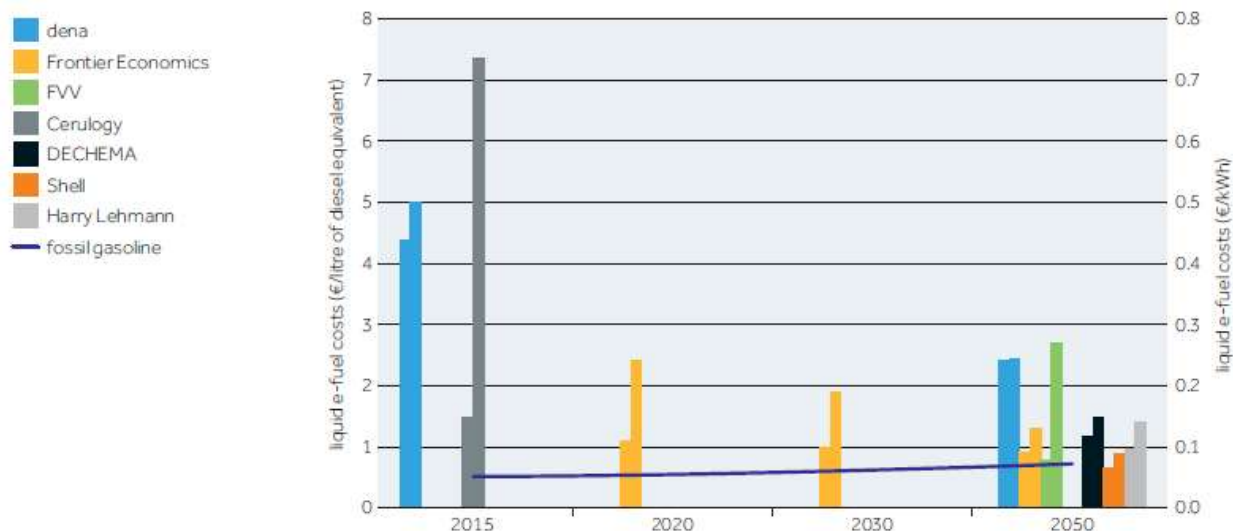


Figura 30. Evolución de los e-fuels líquidos expresados en (€/L y €/kWh) (Soler, 2019).

Tal y como se recopila en la Figura 31, en la que se muestra una comparativa de diferentes parámetros relevantes tales como infraestructura, almacenamiento, inversión y reducción de GEI, para las vías de electrificación, e-fuels y combustibles fósiles. Se destaca que tanto la electrificación como los e-fuels son herramientas que permiten la reducción de GEI, sin embargo, cada una de ellas, poseen tal y como se han identificado a lo largo del presente trabajo sus puntos fuertes y débiles.

	Sector transporte	Infraestructura	Almacenamiento	Inversión	Reducción GEI
Combustibles fósiles	Todos	Existente	Fácil	Baja	Baja
Electrificación	LDV/HDV ^a	Nueva	Difícil	Alta	Alta
E-fuels	Todos	Existente ^b	Fácil	Alta	Alta

a LDV = vehículos ligeros; HDV = vehículos pesados.

b Existente en el caso del e-metano, e-metanol, e-gasolina, e-diesel o e-jet. No existe en el caso del e-hidrógeno, e-amoniaco o e-DME/OME.

Figura 31. Diferentes alternativas frente a diferentes parámetros clave (Soler, 2019).

Por todo ello, cabe concluir que, si bien es cierto que, para el sector de la automoción ligera, en vista del análisis realizado en el presente trabajo cabría esperar que los BEV se encuentren a la cabeza para la descarbonización del sector de la automoción ligera. Hay que destacar, sin embargo, que ninguna de las dos vías evaluadas es perfecta y que deben considerarse ambas útiles para dicho fin. A su vez, aquella que ocupe la vanguardia, vendrá supeditada principalmente, por los desarrollos tecnológicos y traccionada por la legislación.

9. Bibliografía

- Albistur, A. (2022). Diseño y evaluación de electrolizadores basado en membrana de intercambio aniónico (AEM).
- Albrecht, F., & Nguyen, T.-V. (2019). Prospects of electrofuels to defossilize transportation in Denmark – A techno-economic and ecological analysis. *Energy*, 192, 116511. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116511>
- Artz, J., Müller, T. E., Thenert, K., Kleinekorte, J., Meys, R., Sternberg, A., Bardow, A., & Leitner, W. (2018). Sustainable Conversion of Carbon Dioxide: An Integrated Review of Catalysis and Life Cycle Assessment. *Chemical Reviews*, 118(2), 434-504. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00435>
- Biernacki, P., Röther, T., Paul, W., Werner, P., & Steinigeweg, S. (2018). Environmental impact of the excess electricity conversion into methanol. *Journal of Cleaner Production*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.232>
- Bokinge, P., Heyne, S., & Harvey, S. (2020). Renewable OME from biomass and electricity—Evaluating carbon footprint and energy performance. *Energy Science & Engineering*, 8. <https://doi.org/10.1002/ese3.687>
- Buttler, A., & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(P3), 2440-2454.
- Chian, T. Y., Wei, W. L. J., Ze, E. L. M., Ren, L. Z., Ping, Y. E., Bakar, N. Z. A., Faizal, M., & Sivakumar, S. (2019). A Review on Recent Progress of Batteries for Electric Vehicles. 14(24).
- Conway, G., Joshi, A., Leach, F., García, A., & Senecal, P. K. (2021). A review of current and future powertrain technologies and trends in 2020. *Transportation Engineering*, 5, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100080>
- Daggash, H. A., Patzschke, C. F., Heuberger, C. F., Zhu, L., Hellgardt, K., Fennell, P. S., Bhave, A. N., Bardow, A., & Dowell, N. M. (2018). Closing the carbon cycle to maximise climate change mitigation: Power-

to-methanol vs. power-to-direct air capture. *Sustainable Energy & Fuels*, 2(6), 1153-1169.

<https://doi.org/10.1039/C8SE00061A>

Fernández-Dacosta, C., Shen, L., Schakel, W., Ramirez, A., & Kramer, G. J. (2019). Potential and challenges of low-carbon energy options: Comparative assessment of alternative fuels for the transport sector.

Applied Energy, 236, 590-606. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.055>

Ghosh, A. (2020). Possibilities and Challenges for the Inclusion of the Electric Vehicle (EV) to Reduce the Carbon Footprint in the Transport Sector: A Review. *Energies*, 13(10), Article 10.

<https://doi.org/10.3390/en13102602>

Grahn, M., Malmgren, E., Korberg, A. D., Taljegard, M., Anderson, J. E., Brynolf, S., Hansson, J., Skov, I. R., & Wallington, T. J. (2022). Review of electrofuel feasibility—Cost and environmental impact. *Progress in Energy*, 4(3), 032010. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac7937>

Hasan, M. A., Frame, D. J., Chapman, R., & Archie, K. M. (2019). Emissions from the road transport sector of New Zealand: Key drivers and challenges. *Environmental Science and Pollution Research International*, 26(23), 23937-23957. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05734-6>

Helgeson, B., & Peter, J. (2020). The role of electricity in decarbonizing European road transport – Development and assessment of an integrated multi-sectoral model. *Applied Energy*, 262, 114365.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114365>

IEA. (2023). *The Role of E-fuels in Decarbonising Transport*.

IPCC. (2020). *Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter 10: Transport*.

Kazancoglu, Y., Ozbiltekin-Pala, M., & Ozkan-Ozen, Y. D. (2021). Prediction and evaluation of greenhouse gas emissions for sustainable road transport within Europe. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102924.

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102924>

Martin, P. (2023). *Hydrogen Thoughts Distilled*.

OECD. (2023). *ITF Transport Outlook 2023*. Organisation for Economic Co-operation and Development.

https://www.oecd-ilibrary.org/transport/itf-transport-outlook-2023_b6cc9ad5-en

- Profillidis, V. A., Botzoris, G. N., & Galanis, A. T. (2014). Environmental Effects and Externalities from the Transport Sector and Sustainable Transportation Planning – A Review. 4(4).
- PWC. (2018). Five trends transforming the Automotive Industry.
- Reddy, V. J., Hariram, N. P., Maity, R., Ghazali, M. F., & Kumarasamy, S. (2023). Sustainable E-Fuels: Green Hydrogen, Methanol and Ammonia for Carbon-Neutral Transportation. *World Electric Vehicle Journal*, 14(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/wevj14120349>
- Ricardo. (2023). Research for TRAN Committee – Environmental challenges through the life cycle of battery electric vehicles, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies.
- Ridjan, I., Mathiesen, B. V., & Connolly, D. (2016). Terminology used for renewable liquid and gaseous fuels based on the conversion of electricity: A review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3709-3720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.117>
- Sanz, I. (2015). ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN Y EL IMPACTO DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA ECONOMÍA EUROPEA.
- Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J., & Few, S. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 30470-30492. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>
- Schröer, R. (2021). Estudio de prefactibilidad técnica y económica de la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis para las entidades Aguas CAP y Energías de la Patagonia y Aysén SpA.
- Shahzad, K., & Iqbal Cheema, I. (2024). Low-carbon technologies in automotive industry and decarbonizing transport. *Journal of Power Sources*, 591, 233888. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233888>
- Soler, A. (2019). A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030–2050) (literature review).
- Wang, F., Deng, Y., & Yuan, C. (2020). Life cycle assessment of lithium oxygen battery for electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121339. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121339>

Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.130>

Zhao, Y., Pohl, O., Bhatt, A. I., Collis, G. E., Mahon, P. J., Rüther, T., & Hollenkamp, A. F. (2021). A Review on Battery Market Trends, Second-Life Reuse, and Recycling. *Sustainable Chemistry*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/suschem2010011>

Otras fuentes:

20 minutos, “Esto es lo que costarán los combustibles sintéticos o e-fuels, según un estudio”, <https://www.20minutos.es/motor/actualidad/cuanto-costaran-combustibles-sinteticos-5145822/> (accedido diciembre 2023)

20 minutos “Todo sobre el e-fuel: el combustible sintético con el que los coches con motor térmico podrían circular en 2035”, <https://www.20minutos.es/motor/actualidad/todo-sobre-el-e-fuel-el-combustible-sintetico-con-el-que-los-coches-con-motor-termico-podrian-circular-en-2035-5112937/> (accedido diciembre 2023)

Autobild, “Porsche inaugura la planta de gasolina sintética, que puede ser la salvación del motor de combustión”, <https://www.autobild.es/noticias/porsche-inaugura-planta-gasolina-sintetica-puede-ser-salvacion-motor-combustion-1173294> (accedido diciembre 2023)

Autobild, “Todos los tipos de motor de coche que pueden funcionar con e-fuel”, <https://www.autobild.es/noticias/todos-tipos-motor-coche-pueden-funcionar-fuel-1260908> (accedido diciembre 2023)

Business insider “Toyota reducirá a la mitad el costo, el tamaño y el peso de las baterías para sus vehículos eléctricos: lograrán un alcance de 1.200 kilómetros y un tiempo de carga de 10 minutos”, <https://www.businessinsider.es/volantazo-toyota-baterias-vehiculos-electricos-1270004> (accedido diciembre 2023)

Diario motor, “¿Qué es peor para la batería de un coche eléctrico, el calor abrasador o el frío extremo?”, <https://www.diariomotor.com/noticia/que-es-peor-para-la-bateria-de-un-coche-electrico-el-calor-abrasador-o-el-frio-extremo/> (accedido diciembre 2023)

Diario motor, “Acaban de llegar, pero ya hay un cementerio de coches eléctricos donde muchos modelos están casi nuevos”, <https://www.diariomotor.com/electricos/cementerio-coches-electricos/> (accedido diciembre 2023)

Diario motor, “La fábrica de e-fuels de Bilbao será de las más grandes del mundo, y es la apuesta de Repsol y Aramco por los combustibles sintéticos”, <https://www.diariomotor.com/energia-sostenibilidad/la-fabrica-de-e-fuels-de-bilbao-sera-de-las-mas-grandes-del-mundo-y-es-la-apuesta-de-repsol-y-aramco-por-los-combustibles-sinteticos/> (accedido diciembre 2023)

- El motor, “Los 10 coches más vendidos de la primera mitad de 2023”, <https://motor.elpais.com/actualidad/los-10-coches-mas-vendidos-de-la-primera-mitad-de-2023/> (accedido diciembre 2023)
- El motor, “Repsol confirma el gran problema de los combustibles sintéticos”, <https://motor.elpais.com/tecnologia/repsol-confirma-el-gran-problema-de-los-combustibles-sinteticos/> (accedido diciembre 2023)
- Híbridos y eléctricos, “Agua, sol y CO2 para crear un combustible sintético cero emisiones que se añade directamente al motor”, https://www.hibridosyelectricos.com/coches/agua-sol-co2-combustible-sintetico-cero-emisiones-directamente-motor_69481_102.html (accedido diciembre 2023)
- Híbridos y eléctricos, “Stellantis declara la guerra a la “ansiedad por la autonomía” de los coches eléctricos con un nuevo servicio”, https://www.hibridosyelectricos.com/coches/stellantis-declara-guerra-ansiedad-por-autonomia-coches-electricos-con-su-nuevo-servicio_69894_102.html (accedido diciembre 2023)
- Híbridos y eléctricos, “Toyota tiene su propia verdad sobre el coche eléctrico, y la clave está en mil millones de clientes”, https://www.hibridosyelectricos.com/coches/toyota-tiene-verdad-sobre-coche-electrico-clave-mil-millones-de-clientes_69963_102.html (accedido diciembre 2023)
- Ideal, “Los expertos lanzan un aviso sobre el Efuel, el popular combustible sintético”, <https://www.ideal.es/sociedad/expertos-lanzan-aviso-sobre-efuel-popular-combustible-20230527101753-nt.html> (accedido diciembre 2023)
- La información, “Los coches que menos combustible consumen en España, según la OCU”, <https://www.lainformacion.com/economia-negocios-y-finanzas/coches-menos-combustible-consumen-ocu/2888572/> (accedido diciembre 2023)
- La vanguardia, “Los 5 coches que menos consumen por cada tipo de motor: gasolina, diésel, híbrido, eléctrico y gas”, <https://www.lavanguardia.com/motor/actualidad/20230518/8920378/5-coches-consumen-tipo-motor-gasolina-diesel-hibrido-electrico-gas-tsc.html> (accedido diciembre 2023)
- Ministerio para la transición ecológica y reto demográfico (MITECO), “Vehículos”, <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/vehiculos.html> (accedido febrero 2024)
- Motor pasión moto, “Los e-fuels al rescate. Cambridge ha creado gasolina para motos y coches con agua, luz y una hoja artificial. Y funciona”, <https://www.motorpasionmoto.com/industria/e-fuels-al-rescate-cambridge-ha-creado-gasolina-para-motos-coches-agua-luz-hoja-artificial-funciona> (accedido diciembre 2023)
- Noticias trabajo “Mercadona cobra este precio a sus clientes por cargar el coche eléctrico”, <https://noticiastrabajo.huffingtonpost.es/economia/mercadona-cobra-este-precio-clientes-cargar-coche-electrico/> (accedido diciembre 2023)
- OCU, “Cuánto cuesta recargar un coche eléctrico”, <https://www.ocu.org/coches/coches/informe/coste-recargar-coches-electricos> (accedido diciembre 2023)

The objective “Repsol prolongará la vida de los coches de combustión con gasolinas no contaminantes”, <https://theobjective.com/motor/2023-07-05/repsol-coches-combustion-gasolinas/> (accedido diciembre 2023)

Xataka, “CATL cree tener la solución al mayor enemigo de la carga de baterías en el coche eléctrico: el frío”, <https://www.xataka.com/movilidad/catl-asegura-haber-encontrado-solucion-al-mayor-enemigo-carga-baterias-frio> (accedido diciembre 2023)