



POLITÉCNICA



Máster en Energías Renovables y Medio Ambiente

Curso: 2024/2025

Trabajo Fin de Máster

Estudio comparativo de las diferentes soluciones para la movilidad en vehículos ligeros de carretera: energía eléctrica vs combustible 100% renovable

Fecha: 14 de octubre de 2025

Tutor: María Dolores Cárdenas
Almena (Repsol)
Luis Miguel Rodríguez Antón (UPM)

Autor: Álvaro Palacio Ferreiro



Agradecimientos

A todo el equipo de Product Design de Repsol, y en especial a Dolores Cárdenas, gracias por haberme dado la oportunidad de haber trabajado con vosotros durante 5 meses. Sin la base de conocimientos que adquirí durante esta experiencia, no hubiese completado este trabajo.

A Dolores, gracias por haberme ofrecido este proyecto cuando aún no nos conocíamos. Gracias por todas las revisiones, reuniones largas, correos informativos y tardes de trabajo intensas. Gracias por tu dedicación, tu confianza y tu tiempo.

A la dirección del Máster ERMA, Julio y Teodoro, gracias por aceptar mi inscripción en este máster, y por la paciencia en todos los trámites hasta conseguir mi matriculación. Gracias por este excelente máster, por todo el aprendizaje adquirido y por todos los módulos, conferencias y visitas. Sin duda, una formación imprescindible del mundo de la energía, que recomendaré allá donde vaya. Le deseo lo mejor a este programa, y espero que siga siendo una referencia durante mucho tiempo.

A todos mis compañeros del máster, gracias por las sonrisas en tardes apáticas, por explicarme lo que no entendía, por las charlas sobre nuestros largos días laborales, por aquellos descansos en la máquina expendedora en los que escogíamos un producto aleatorio para picar. Os echaré de menos. Espero que nuestras vidas se vuelvan a cruzar.

A Antonio, por tu cercanía diaria y por tu presencia. A Luis Miguel, por la coordinación de un módulo estupendo que sentó las bases de este trabajo, y por el ofrecimiento a tutorizarme internamente.

A Álvaro, por recomendarme para este máster. Por tus innumerables recomendaciones durante el curso, por tu ayuda con los trabajos. Y a Sara, por acompañarme en este largo viaje, por haber estado siempre ahí y por no haber dejado nunca de creer.

Con mucho cariño,

Álvaro



Índice

Agradecimientos	2
Lista de figuras	5
Lista de tablas	7
Lista de abreviaturas	8
Resumen	10
Introducción	11
Objetivos	11
Alcance	13
Justificación	14
Acuerdo de París	14
Pacto Verde Europeo y Fit for 55	15
Análisis de soluciones de descarbonización y selección de opciones estudiadas	17
Energías para la movilidad	17
Tecnologías de propulsión de vehículos	21
Compatibilidad de los combustibles renovables con los vehículos del parque	25
Requisitos y datos de partida	27
Emplazamiento	30
Normas y Bibliografía Clave	31
Análisis tecno-económico de las soluciones de descarbonización del transporte ligero por carretera	33
Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en ciclo de vida	33
Contexto	33
Antecedentes	33
Metodología y criterios aplicados	34
Presentación y Análisis de Resultados	43
Conclusiones	46
Emisiones contaminantes locales	47
Contexto	47
Antecedentes	50
Metodología y criterios aplicados	51
Presentación y análisis de resultados	54
Conclusiones	58
Consumo de agua	59
Contexto	59
Antecedentes	59
Metodología y criterios aplicados	60



Presentación y análisis de resultados	63
Conclusiones	68
Total Cost of Ownership (TCO)	69
Contexto	69
Antecedentes.....	70
Metodología y criterios aplicados	71
Presentación y análisis de resultados	75
Conclusiones	81
Seguridad de suministro	82
Abundancia del recurso energético.....	82
Eficiencia en el uso de electricidad renovable	90
Uso de materiales escasos.....	104
TRL de tecnologías de propulsión y energía	113
Comodidad de uso para el usuario final	116
Velocidad de implantación	118
Infraestructura de suministro al usuario final	120
Consideraciones finales del análisis comparativo	129
Conclusiones	135
Líneas de trabajo futuro	138
Referencias.....	139



Lista de figuras

Figura 1. Cronograma normativo de las emisiones de CO ₂ en vehículos. Fuente: EPRS [11].	17
Figura 2. Esquema de un vehículo HEV. Fuente: Clean Vehicle [20].	21
Figura 4. Esquema de un vehículo PHEV. Fuente: Clean Vehicle [20].	22
Figura 3. Esquema de un vehículo BEV. Fuente: Clean Vehicle [20].	23
Figura 5. Esquema de un vehículo FCEV. Fuente: Clean Vehicle [20].	23
Figura 6. Ventas de vehículos turismos en la UE por tecnología. Fuente: elaboración propia a partir de ACEA [22].	24
Figura 7. Emisiones de GEI en ciclo de vida para distintas alternativas de descarbonización, en 2025. Fuente: elaboración propia.	43
Figura 8. Emisiones de GEI en ciclo de vida para distintas alternativas de descarbonización, en 2035. Fuente: elaboración propia.	45
Figura 9. Límites de emisiones contaminantes en gasolina y diésel, según cada norma Euro. Fuente: Dieselnet [67].	48
Figura 10. Evolución de las emisiones contaminantes de NO _x en vehículos de gasolina. Fuente: ICCT [73].	50
Figura 11. Ensayo comparativo de las emisiones de NO _x . Fuente: elaboración propia a partir del estudio de Seat [44].	54
Figura 12. Estudio comparativo de las emisiones de PN. Fuente: elaboración propia a partir del estudio de Seat [44].	54
Figura 13. Estudio comparativo de las emisiones de CO. Fuente: elaboración propia a partir del estudio de Seat [44].	55
Figura 14. Ensayo comparativo de los principales contaminantes. Fuente: elaboración propia a partir del estudio de Seat [44].	56
Figura 15. Tendencias en la emisión de partículas de desgaste PM _{2,5} y PM ₁₀ en los últimos años. Fuente: elaboración propia a partir del Sistema Español de Inventario de Emisiones [76].	57
Figura 16. Consumo de agua azul para vehículo ligero en 2025 (L/km). Fuente: elaboración propia a partir del estudio de Sphera [42].	63
Figura 17. Consumo de agua azul para vehículo ligero en 2035 (L/km). Fuente: elaboración propia a partir del estudio de Sphera [42].	65
Figura 18. Consumo de agua en ICEVs de gasolina. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [42] y varias fuentes adicionales.	67
Figura 19. Consumo de agua en BEVs en diferentes fuentes y ejemplos. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [42] y varias fuentes adicionales.	67
Figura 20. Disposición a pagar un precio adicional por un BEV frente a un ICEV comparable. Fuente: elaboración propia a partir de McKinsey & Company [83].	70
Figura 42. Precio medio de la energía por cada 100km. Fuente: elaboración propia a partir del ICCT [84].	71
Figura 21. TCO - Comparativa 2025. Fuente: elaboración propia.	80
Figura 22. TCO - Comparativa 2035. Fuente: elaboración propia.	80
Figura 23. Potencial de producción de combustibles renovables en la UE y demanda actual de combustible fósil en el sector transporte. Fuente: elaboración propia a partir del Imperial College London [99] y Fuels Europe [100].	84
Figura 24. Potencial de producción de combustibles renovables en España y demanda actual de combustible fósil en todos los sectores. Fuente: elaboración propia a partir del Imperial College London [99] y Cores [39].	85
Figura 25. Biomasa para biocombustibles disponible por país de la UE en 2050. Fuente: Imperial College London [99].	86
Figura 26. Potencial de biomasa para biocombustibles y demanda UE – 2030. Fuente: elaboración propia a partir del informe de la Comisión Europea [101].	87



Figura 27. Potencial de biomasa para biocombustibles y demanda UE – 2050. Fuente: elaboración propia a partir del informe de la Comisión Europea [101].	87
Figura 29. Eficiencia energética para diferentes opciones de movilidad. Fuente: T&E [106].	91
Figura 30. Diagrama de flujo de la energía eléctrica de la ruta de HVO en un ICEV. Fuente: elaboración propia.	95
Figura 31. Diagrama de flujo de la energía eléctrica de la ruta e-fuel en HEV. Fuente: elaboración propia.	97
Figura 32. Diagrama de flujo energético del proceso de conducción de un BEV. Fuente: elaboración propia.	99
Figura 33. Comparativa de la eficiencia en el uso de la energía eléctrica para BEV, HEV con e-fuel e ICEV con Diésel bio. Fuente: elaboración propia.	101
Figura 34. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo (2025). Parte 1. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [43].	107
Figura 35. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo (2035). Parte 1. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [38].	108
Figura 36. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo (2025). Parte 2. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [43].	108
Figura 37. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo (2035). Parte 2. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [38].	109
Figura 38. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo y uso (2025). Parte 1. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [43].	109
Figura 39. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo y uso (2035). Parte 1. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [38].	110
Figura 40. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo y uso (2025). Parte 2. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [43].	111
Figura 41. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo y uso (2035). Parte 2. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [38].	112
Figura 43. Preferencia del tipo de vehículo en la próxima adquisición. Fuente: elaboración propia a partir del informe de McKinsey & Company [83].	117
Figura 44. Cuota de mercado de los BEV respecto al total de nuevas matriculaciones en Europa. Fuente: El País [84], a partir del último informe del ICCT [41].	119
Figura 45. Puestos de recarga de vehículos eléctricos por país, a finales de 2023. Fuente: EAFO [130].	121
Figura 46. Número de cargadores públicos para vehículos eléctricos en la UE. Fuente: elaboración propia a partir de T&E [136].	122
Figura 47. Número de cargadores públicos para vehículos eléctricos en España. Fuente: elaboración propia a partir de T&E [136].	123
Figura 48. Tendencia de crecimiento flota de vehículos eléctricos enchufables y puntos de recarga en la UE. Fuente: elaboración propia a partir de T&E [136].	124
Figura 49. Estaciones de servicio con HVO en la UE. Fuente: elaboración propia a partir de Efuelsnow [32].	127
Figura 50. Nueva propuesta de etiquetado de vehículos para el transporte por ciudades. Fuente: El País [146].	131



Lista de tablas

Tabla 1. Requisitos de reducción de emisiones de los combustibles renovables. Fuente: elaboración propia a partir de la RED II y la RED III.....	19
Tabla 2. Porcentaje de ventas de coches en España, por tecnología. Fuente: elaboración propia, a partir de OCU [23].	24
Tabla 3. Secciones del estudio y datos de partida. Parte 1.	29
Tabla 4. Secciones del estudio y datos de partida. Parte 2.	30
Tabla 5. Alternativas de descarbonización escogidas en el análisis de emisiones de GEI en ciclo de vida. Fuente: elaboración propia.	35
Tabla 6. Emisiones de GEI en la fabricación del vehículo. Fuente: Ricardo.	36
Tabla 7. Tamaños de batería de referencia para HEV y BEV.	36
Tabla 8. Emisiones en la red eléctrica, sin considerar pérdidas de transporte y distribución.....	37
Tabla 9. Emisiones en la red eléctrica, considerando pérdidas de transporte y distribución.	37
Tabla 10. Consumos energéticos para cada una de las 3 alternativas, en 2025 y 2035.	38
Tabla 11. Densidades y poderes caloríficos del diésel y la gasolina.	39
Tabla 12. Consumo energético final (MJ/km) de las 3 alternativas, en 2025 y 2035.	39
Tabla 13. Factores de emisión para los combustibles fósiles.	40
Tabla 14. Factores de emisión para los distintos combustibles renovables considerados.	40
Tabla 15. Emisiones en mantenimiento y fin de vida útil. Fuente: Ricardo.	42
Tabla 16. Comparativa de las emisiones de GEI entre 2025 y 2035 (g/km).	45
Tabla 17. Factores de conformidad del ensayo RDE respecto a WLTC. Fuente: elaboración propia a partir de Dieselnet [69].	49
Tabla 18. Comparativa del límite de emisiones contaminantes para vehículos ligeros entre Euro 6 y Euro 7 [75]. Fuente: elaboración propia.	52
Tabla 19. Alternativas escogidas en el análisis de emisiones contaminantes. Fuente: elaboración propia.	53
Tabla 20. Comparativa de emisiones no procedentes del tubo de escape. Fuente: elaboración propia a partir de AVL [56] y la Universidad de Leeds [74].	57
Tabla 21. Alternativas de descarbonización escogidas en el análisis de consumo de agua en ciclo de vida. Fuente: elaboración propia.	61
Tabla 22. Tamaños de batería y consumos energéticos de los vehículos del estudio de consumo de agua. Fuente: elaboración propia.	62
Tabla 23. Comparativa del consumo de agua en ciclo de vida entre 2025 y 2035 (L/km).	66
Tabla 24. Tamaños de batería y consumos energéticos de los vehículos del estudio de TCO. Fuente: elaboración propia.	72
Tabla 25. Consumos de gasolina y electricidad anuales en cada alternativa. Fuente: elaboración propia.	73
Tabla 26. Costes del vehículo. Fuente: elaboración propia.	75
Tabla 27. Costes de energía. Fuente: elaboración propia.	76
Tabla 28. Coste total sin impuestos. Fuente: elaboración propia.	77
Tabla 29. Costes de impuestos. Fuente: elaboración propia.	78
Tabla 30. Intereses del préstamo. Fuente: elaboración propia.	79
Tabla 31. Escenarios considerados en el estudio de eficiencia en el uso de la electricidad renovable. Fuente: elaboración propia.	93
Tabla 32. Pérdidas de energía en la red eléctrica. Fuente: CNMC.	94
Tabla 33. Consumos en el proceso de conducción de un ICEV con HVO. Fuente: elaboración propia.	96
Tabla 34. Consumos en el proceso de conducción de un HEV con e-fuel. Fuente: elaboración propia.	98
Tabla 35. Consumos en el proceso de conducción de un BEV. Fuente: elaboración propia.	100
Tabla 36. Consumo energético de las 3 alternativas y escenarios considerados (kWh/km). Fuente: elaboración propia.	101
Tabla 37. Comparativa de eficiencia energética eléctrica para vehículo eléctrico. Fuente: T&E [106] y elaboración propia.	102



Tabla 38. Materiales críticos y ejemplos de uso. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [43].....	105
Tabla 39. Alternativas de descarbonización escogidas en el análisis de materiales críticos en ciclo de vida. Fuente: elaboración propia.....	106
Tabla 40. Tamaños de batería y consumos energéticos de los vehículos del estudio de materiales críticos. Fuente: elaboración propia.....	106

Lista de abreviaturas

- BEV: *Battery Electric Vehicle* – Vehículo eléctrico de batería
- DGT: Dirección General de Tráfico
- ENTSO-E: *European Network of Transmission System Operators for Electricity* – Red Europea de Gestores de Redes de Transporte de Electricidad
- FCEV: *Fuel Cell Electric Vehicle* – Vehículo eléctrico de pila de combustible
- GEI: Gases de Efecto Invernadero
- GLP: Gases Licuados del Petróleo
- GNC: Gas Natural Comprimido
- GNL: Gas Natural Licuado
- H₂ ICE: Vehículo de motor de combustión a hidrógeno
- HEV: *Hybrid Electric Vehicle* – Vehículo eléctrico híbrido
- HVO: *Hydrotreated Vegetable Oil* – Aceite vegetal hidrotratado (Diésel 100% renovable)
- ICCT: *International Council on Clean Transportation* – Consejo Internacional del Transporte Limpio
- ICEV: *Internal Combustion Engine Vehicle* – Vehículo de combustión interna
- IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
- IEA: *International Energy Agency* – Agencia Internacional de la Energía
- JEC (JRC -*Joint Research Centre*, Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, Eucar y CONCAWE)
- JRC: *Joint Research Centre* – Centro Común de Investigación de la Comisión Europea
- MHEV: *Mild Hybrid Electric Vehicle* – Vehículo híbrido ligero
- ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible
- PHEV: *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* – Vehículo híbrido enchufable
- RED II / RED III: *Renewable Energy Directive II/III* – Directiva de Energías Renovables II/III
- REEV: *Range Extended Electric Vehicle* – Vehículo eléctrico de autonomía extendida
- RFNBO: *Renewable Fuels of Non-Biological Origin* – Combustibles renovables de origen no biológico
- TCO: *Total Cost of Ownership* – Coste total de propiedad
- TRL: *Technology Readiness Level* – Nivel de madurez tecnológica



- TtW: *Tank to Wheel* – Emisiones en el uso del vehículo
- UE: Unión Europa
- UCO: *Used Cooking Oil* – Aceite de cocina usado
- WtT: *Well to Tank* – Emisiones de fabricación del combustible/electricidad para la propulsión
- WtW: *Well to Wheel* – Emisiones de fabricación del combustible/electricidad y en el uso en el vehículo
- ZBE: Zonas de Bajas Emisiones



Resumen

En este Trabajo de Fin de Máster se van a estudiar de forma comparativa dos alternativas de descarbonización para la movilidad de vehículo ligero por carretera: los vehículos eléctricos de batería (BEV), y los vehículos de combustión interna alimentados con combustible 100% renovable (ICEV/HEV). El estudio se enmarca en el contexto normativo europeo, donde el paquete Fit for 55 orienta la descarbonización del transporte hacia la electrificación como opción prioritaria, dejando un espacio, de momento, más limitado para los combustibles renovables, aunque abierto a revisión en la actualización prevista para 2026 del Reglamento de emisiones de CO₂ de vehículos ligeros.

La investigación responde a la falta de estudios previos que comparen de forma integral estas alternativas y busca fomentar el análisis crítico y basado en evidencias técnicas sobre las distintas opciones de transición energética. Para ello, se incluye un análisis multidimensional que abarca criterios como las emisiones de gases de efecto invernadero en ciclo de vida, los contaminantes locales, el consumo de agua, el coste total de propiedad (TCO, del inglés *Total Cost of Ownership*), la abundancia del recurso, la eficiencia en el uso de la energía eléctrica renovable, los materiales críticos, la madurez tecnológica, la comodidad de uso para el usuario y la infraestructura de suministro. Se emplean datos de referencia de fuentes internacionales (IEA, JEC, ENTSO-E, ICCT) e informes sectoriales recientes, considerando escenarios presentes (2025) y futuros (2035).

Los resultados muestran que la electrificación aporta claras ventajas en eficiencia energética y reducción de emisiones locales, aunque plantea retos en el consumo de materiales críticos, la huella de carbono de las baterías y el desarrollo de infraestructura de recarga. Por su parte, los combustibles renovables reducen de forma significativa las emisiones de gases de efecto invernadero, son plenamente compatibles con el parque actual y las redes de suministro, y requieren menos recursos críticos, permitiendo una implantación más rápida. En términos económicos, ambas opciones resultan competitivas dependiendo del escenario y las políticas de apoyo vigentes.

Como conclusión, se enfatiza que, aunque la normativa comunitaria favorece la electrificación, los combustibles renovables son una solución complementaria igualmente válida para acelerar la transición energética, especialmente en sectores y regiones donde la electrificación total es más compleja. Sólo reconociendo todas las vías tecnológicas será posible alcanzar de manera eficaz y equilibrada los objetivos de neutralidad climática marcados por la Unión Europea.



Introducción

Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es realizar un análisis comparativo de los principales criterios técnico-económicos de los vehículos eléctricos (BEV) y de los vehículos de combustión interna alimentados con combustible 100% renovable para el transporte ligero de carretera, en concreto, los vehículos turismos. La idea principal es **buscar potenciar las oportunidades** que ambas opciones puedan generar en la descarbonización del sector.

Este interés viene motivado especialmente por dos factores:

- El contexto regulatorio, marcado por la próxima revisión en 2026 del Reglamento europeo de emisiones de CO₂ para vehículos ligeros de carretera, en la que previsiblemente se evaluará la posibilidad de continuar matriculando vehículos nuevos con motor de combustión que empleen exclusivamente combustibles neutros en CO₂ a partir de 2035.
- La escasez de estudios previos en los que se analicen combustibles 100% renovables desde un marco comparativo respecto a los vehículos eléctricos, en gran medida debido al escaso despliegue comercial de estos combustibles hasta bien entrada la década de 2020.

Para realizar este análisis comparativo, los objetivos concretos en este trabajo son los siguientes:

- Analizar el impacto ambiental relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero de los vehículos eléctricos (BEV) y los de motor de combustión interna con combustible 100% renovable (ICEV/HEV) tomando en consideración **el ciclo de vida completo**, con el fin de observar las diferencias entre ambas opciones en función del país de circulación del vehículo o el tipo de combustible con el que se alimente, y si ambas soluciones permiten reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a la comparativa fósil.
- Evaluar las **emisiones de contaminantes locales** de vehículos ICEV modernos, con combustible 100% renovable y sin él, en comparación con las de uno eléctrico, con el fin de valorar su impacto en la calidad del aire en las ciudades.



- Comparar la **eficiencia en el uso de la energía eléctrica renovable** entre las 2 tecnologías, identificando áreas y estrategias de mejora en los motores de combustión, que aumenten su desempeño energético y competitividad frente al eléctrico en este ámbito.
- Estudiar la **viabilidad económica** de ambas alternativas, identificando posibles barreras y motivaciones en el consumidor y fomentando decisiones de compra más informadas respecto al coche eléctrico.
- Evaluar la **capacidad de integración de los combustibles renovables en las infraestructuras industriales existentes** y los vehículos del parque, así como su potencial para favorecer una transición más rápida y el desarrollo de una industria local, competitiva y menos dependiente de proveedores externos.
- Analizar el posible potencial de los **combustibles renovables como solución complementaria a la electrificación**, resaltando su relevante papel en el objetivo de los cumplimientos climáticos, en especial en sectores o lugares donde la electrificación 100% renovable sea más complicada de conseguir.
- **Promover el conocimiento en la población acerca de la disponibilidad de combustibles 100% renovables** en determinadas estaciones de servicio, subrayando su relevancia en los procesos de descarbonización del transporte y considerando que, en gran medida, esta alternativa aún es poco conocida.
- Examinar el marco regulador de la Unión Europea (UE), identificando barreras y oportunidades y aportar evidencia que respalde la **consideración de los combustibles renovables, tanto los biocombustibles como los de origen no biológico, como opción neutra en carbono** en el sector del transporte ligero por carretera posterior al 2035.
- Contribuir, a través del desarrollo del TFM, a generar un marco de reflexión que pueda servir como referencia en el debate público y académico sobre el papel de los combustibles renovables en las políticas europeas de descarbonización, **fomentando el reconocimiento de todas las opciones de descarbonización que ayuden a cumplir los objetivos de neutralidad climática**, de modo que se amplíen las opciones disponibles para los consumidores.



Alcance

El alcance del TFM abarca los siguientes puntos:

- Comparar el impacto ambiental de los vehículos eléctricos (BEV) y los vehículos de combustión interna con combustible 100% renovable evaluando tanto las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el ciclo de vida, como las emisiones contaminantes (óxidos de nitrógeno y partículas) a nivel local.
- Analizar la eficiencia en el uso de la energía eléctrica renovable entre las 2 tecnologías, considerando factores como la generación de electricidad renovable, la producción del combustible, y el consumo energético por km recorrido.
- Determinar el coste total de propiedad (TCO) de un coche eléctrico (BEV) frente a uno híbrido no enchufable de gasolina (HEV), teniendo en cuenta los costes de infraestructura, producción, precio para el consumidor final e incentivos fiscales.
- Analizar el consumo de agua en todo el ciclo de vida para ambas alternativas, considerando la fase de producción del propio vehículo y la generación y suministro de energía para su funcionamiento. El uso de agua es un indicador ambiental menos visible pero muy relevante en ciertas etapas del ciclo de vida del vehículo.
- Realizar una evaluación del grado de madurez tecnológica (TRL) de las rutas de producción de energía renovable que se suministra a ambas opciones de vehículos, así como de la facilidad y comodidad de su uso para el usuario final, que permita identificar barreras técnicas y de experiencia de usuario que puedan frenar su adopción.
- Diseñar un análisis de la seguridad y estabilidad del suministro en cada alternativa, considerando, además de la eficiencia energética, la disponibilidad de recursos energéticos y materiales críticos, con el objetivo de garantizar la resiliencia y sostenibilidad del sistema energético.
- Estudiar la viabilidad y la velocidad de implantación de las 2 alternativas, teniendo en cuenta el desarrollo futuro en la producción de la energía para el vehículo, y la infraestructura de suministro (electrolineras, gasolineras) para su adopción a gran escala.



Justificación

El cambio climático es un reto que afecta a todo el planeta y no entiende de fronteras. El término hace referencia a los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos del planeta, atribuible tanto a procesos naturales como, principalmente, a la actividad humana, especialmente por el aumento en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero (GEI) derivados de la quema de combustibles fósiles, la deforestación y otras prácticas productivas [1].

Para enfrentarlo, hacen falta acciones conjuntas, desde lo local hasta lo internacional, y una colaboración global que nos ayude a avanzar hacia economías con menos emisiones de carbono. Los gases de efecto invernadero (GEI) que se liberan en una región impactan al resto del mundo, por lo que es fundamental alcanzar acuerdos internacionales que permitan reducir sus efectos.

Acuerdo de París

Para hacer frente al cambio climático y sus impactos negativos, los líderes del mundo alcanzaron un hito clave el 12 de diciembre de 2015, durante la Conferencia de la ONU sobre el Cambio Climático (COP21) en París, donde se logró el histórico **Acuerdo de París** [2]. Este acuerdo internacional, de carácter legalmente vinculante, entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Hasta la fecha, ha sido ratificado por 194 partes, que incluyen a 193 países y la Unión Europea.

Su objetivo central a largo plazo es lograr una reducción sustancial de las emisiones de GEI con el fin de **limitar el aumento de la temperatura global en este siglo a un máximo de 2 °C, procurando además no superar los 1,5 °C** [3]. Cada cinco años, los países deben revisar y reforzar sus compromisos climáticos.

El Acuerdo de París, además, sentó las bases para una transición global hacia un futuro con **emisiones netas cero**. A partir de este pacto, distintos informes, como los del IPCC [4] (Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), comenzaron a advertir que, para mantener el calentamiento global por debajo de 1,5 °C, es indispensable que el mundo alcance **cero emisiones netas de CO₂ alrededor del año 2050**. Esta meta ha sido asumida desde entonces por muchos países y regiones como parte de sus estrategias climáticas.



Numerosas investigaciones recientes han comenzado a cuestionar la viabilidad de mantener el aumento de la temperatura global por debajo de $1,5^{\circ}\text{C}$, lo que convierte ese objetivo en un desafío cada vez más difícil de alcanzar. De hecho, 2024 marcó un hito preocupante: fue el primer año en que se superó ese umbral, registrándose una temperatura media global de $1,55^{\circ}\text{C}$ por encima de los niveles preindustriales [5].

En el contexto europeo y tras fijarse la meta de alcanzar cero emisiones netas para 2050 mediante el Pacto Verde, la Unión Europea ha ido elaborando en los últimos años una serie de paquetes de medidas orientadas a lograr ese propósito.

Pacto Verde Europeo y Fit for 55

El **Pacto Verde Europeo** fue una iniciativa impulsada por la Unión Europea y presentada en diciembre de 2019, con la ambiciosa meta de conseguir que los Estados miembros sean **climáticamente neutros** para el año 2050. Es importante no confundirlo con un objetivo de “**cero emisiones**”. Al buscar la neutralidad climática, se contemplan tanto las soluciones que no generen emisiones como aquellas que, aunque las generen, consigan un balance neto nulo de emisiones de GEI.

Como parte de este compromiso, en julio de 2021 se lanzó el paquete legislativo “**Fit for 55**”, que establece un objetivo intermedio al Net Zero 2050: reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55 % para 2030, tomando como referencia los niveles de 1990 [6].

Dentro de este paquete legislativo, hay varias medidas fundamentales que tienen un impacto directo en el ámbito abordado por este estudio:

-RED III (Renewable Energy Directive III, Directiva (UE) 2023/2413 [7]): Se trata de la tercera revisión de la Directiva de Energías Renovables (RED), cuyo objetivo principal es fomentar el uso de energías renovables en todos los sectores. Esta revisión establece una meta vinculante para que, en 2030, al menos el 42,5 % de la energía consumida en la Unión Europea provenga de fuentes renovables. Además, se anima a los Estados miembros a esforzarse aún más, buscando llegar hasta el 45 %.



-Reglamento (UE) 2023/851 [8]: esta normativa refuerza los límites para las emisiones de CO₂ por tubo de escape en vehículos ligeros turismos y comerciales del Reglamento 2019/631 [9]:

- Se establece una reducción del 55% de las emisiones de CO₂ para turismos nuevos y del 50% para las furgonetas durante el periodo 2030-2034, en comparación con los niveles de 2021. Estas además complementan las impuestas previamente en el periodo 2021-2030, por el Reglamento 2019/631:
 - Desde 2021, se fija un máximo de 95 g CO₂/km para coches nuevos de pasajeros y 147 g CO₂/km para vehículos comerciales ligeros (furgonetas).
 - Para 2025, se establecen metas adicionales que exigen reducir las emisiones en un 15 % para ambos tipos de vehículos.
- Se establece una reducción del 100% de las emisiones de CO₂ tanto para vehículos como furgonetas a partir del 2035.

Esta última medida implica que, desde 2035, todos los turismos nuevos vendidos en la Unión Europea deberán ser de cero emisiones en tubo de escape, como los eléctricos, o aquellos impulsados por combustibles como hidrógeno o amoníaco.

Por ahora no se incluyen otras soluciones que, aunque no sean cero emisiones en el tubo de escape, sí logran un balance neto nulo de emisiones. Es el caso de los combustibles renovables, cuyo carácter de emisiones netas cero ha sido reconocido por organismos como el IPCC [10]. Esto último se debe a que el CO₂ liberado durante su combustión forma parte del ciclo natural del carbono, al estar previamente contenido en la materia prima con la que se producen estos combustibles, y por tanto no se añade como carbono fósil nuevo a la atmósfera.

No obstante, en este Reglamento se acabó incluyendo un considerando para analizar la posibilidad de permitir que se sigan vendiendo vehículos nuevos con motor de combustión a partir de 2035, pero que usen exclusivamente **combustibles neutros en CO₂**. Esta excepción y esta definición de combustible neutro en carbono no está aprobada aún y deberá definirse en una normativa separada. En 2026 está prevista una revisión de este Reglamento, momento clave que podría definir el futuro de estos combustibles en el transporte ligero de carretera en la Unión Europea.

En la imagen siguiente se presenta el cronograma normativo que regula las emisiones de CO₂ en vehículos, a partir de la entrada en vigor del Reglamento (UE) 2023/851:

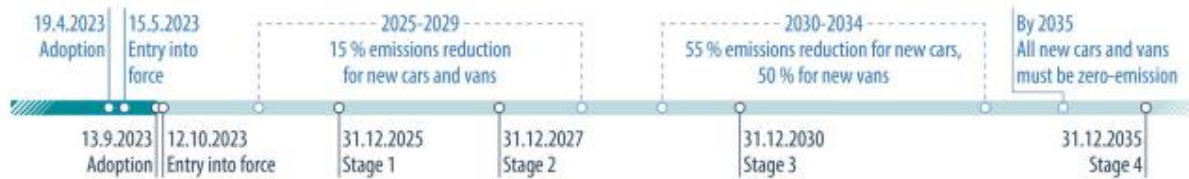


Figura 1. Cronograma normativo de las emisiones de CO₂ en vehículos. Fuente: EPRS [11].

Con este contexto regulatorio y ante el reto climático al que nos enfrentamos, es necesario analizar en detalle qué soluciones pueden contribuir a la descarbonización del transporte por carretera. Algunas de ellas ya se acaban de nombrar en esta sección. En el siguiente apartado, se analizarán las distintas soluciones y se explicará qué opciones se estudiarán en este trabajo.

Análisis de soluciones de descarbonización y selección de opciones estudiadas

Energías para la movilidad

El sector transporte representa una de las mayores fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la Unión Europea, generando alrededor del 25 % del total. De ese porcentaje, aproximadamente el 73 % proviene del transporte por carretera, lo que evidencia el peso significativo de este sector en la huella climática del continente [12]. Dentro de este transporte, los vehículos ligeros representan el 61%, equivalente a un 11% del total de emisiones de GEI en la UE.

En consecuencia, la RED III [7] plantea dos objetivos específicos, de los cuales cada Estado miembro debe cumplir al menos uno: lograr que al menos el **29 % del consumo final de energía en el sector transporte provenga de fuentes renovables para 2030**; o bien, **reducir las emisiones de GEI en ese sector en un 14,5 % para esa misma fecha**.

Para alcanzar estas metas, la RED III plantea dos caminos principales: por un lado, impulsar la **electricidad renovable** a través del uso de vehículos eléctricos; y por otro, promover los **combustibles renovables**.

Dentro de aquí, destacan dos categorías:



- **Biocombustibles:** son combustibles producidos principalmente a partir de la biomasa, y pueden ser sólidos, gases o líquidos [13]. Se clasifican en tres tipos: los **biocombustibles de primera generación**, que se producen a partir de cultivos alimentarios o energéticos convencionales como la soja, palma, maíz o trigo; los **biocombustibles avanzados** (listados en el Anexo IX A de la RED III), producidos a partir de materias primas no alimentarias y más sostenibles, como residuos forestales o lignocelulósicos, y los **biocombustibles residuales** (listados en el Anexo IX B de la RED III), derivados de residuos orgánicos del sector alimentario, agrícola o urbano, como los aceites de cocina usados o las grasas animales.
- **RFNBO** (*Renewable Fuels from Non-Biological Origin*). Son combustibles líquidos o gaseosos cuyo contenido energético proviene de fuentes renovables distintas a la biomasa. También denominados coloquialmente como combustibles sintéticos o e-fuels, se producen a partir de hidrógeno electrolítico —obtenido mediante la electrólisis del agua con electricidad renovable— y CO₂ capturado. Dentro de esta categoría se incluyen el propio hidrógeno electrolítico, la e-gasolina, el e-queroseno, el e-diesel, el e-GNC, el e-metanol y el e-amoniaco.¹

Los combustibles renovables, además, ofrecen varias ventajas [14]. Una de las principales es que pueden utilizarse en los motores actuales y en distintos medios de transporte (coches, camiones, barcos, aviones, entre otros), lo que los convierte en una herramienta eficaz sin necesidad de modificar la infraestructura existente. Desde el punto de vista ambiental, como se comentó anteriormente, también contribuyen a reducir el aumento de gases de efecto invernadero, al tener un balance nulo de emisiones en tubo de escape, es decir, las emisiones de CO₂ en el tubo de escape del vehículo, son las mismas que tuvieron que retirarse de la atmósfera para producir dichos combustibles, bien sea gracias a la fotosíntesis en el caso de los biocombustibles, o bien sea con captura industrial de CO₂ para los e-fuels.

En cambio, en el balance Well-to-Wheel (WtW), para que estos combustibles renovables sean reconocidos como tales según las directivas de energías renovables, deben cumplir los siguientes requisitos de reducción de emisiones respecto al comparador fósil (94 g CO₂/MJ):

¹ Estos dos últimos no se consideran e-fuels pero sí RFNBO sólo en el caso de que no se usen como combustible directo en el transporte.

Tabla 1. Requisitos de reducción de emisiones de los combustibles renovables. Fuente: elaboración propia a partir de la RED II y la RED III.

Tipo de combustible	Instalaciones	Reducción mínima de emisiones WtW respecto al fósil (94 g CO ₂ /MJ)
Biocombustibles [15]	Instalaciones puestas en funcionamiento antes del 5 de octubre de 2015	50%
	Instalaciones puestas en funcionamiento entre el 6 de octubre de 2015 hasta el 31 de diciembre de 2020	60%
	Instalaciones puestas en funcionamiento a partir del 1 de enero de 2021	65%
RFNBO [7]	Todas	70%

Otra ventaja de estos combustibles es que sus características son muy similares a las de los combustibles fósiles, por lo que ofrecen un rendimiento comparable. Asimismo, pueden reforzar la independencia energética al permitir el uso de recursos producidos localmente, promoviendo la economía circular y fomentando el desarrollo industrial y la generación de empleo, lo que coincide con las recomendaciones del Informe Draghi para aumentar la competitividad europea mediante un mayor aprovechamiento de recursos autóctonos [16].

Además, estos combustibles son compatibles con las redes actuales de distribución y comercialización, lo que facilita su integración progresiva junto a otras soluciones como la electrificación o el hidrógeno. La RED III establece unas directrices claras respecto al uso de materias primas para la producción de combustibles renovables, buscando garantizar su sostenibilidad y evitar competir con otros sectores como el alimentario. Por ello, los biocombustibles de primera generación están cada vez más limitados, fomentando el desarrollo y la utilización de biocombustibles avanzados.



El HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*, Aceite Vegetal Hidrotratado) es uno de los combustibles renovables más relevantes, y ya se comercializa en muchas estaciones de servicio de Europa. Se produce por un proceso de hidrogenación de aceites vegetales o grasas animales, y sus características son muy similares a las del diésel convencional, siendo compatible en todos los motores de los vehículos del parque automovilístico. El despliegue de gasolina 100% renovable, en cambio, aún es muy bajo, aunque en octubre de 2025 Repsol ha empezado a comercializarla en 20 estaciones de servicio en España [17].

No obstante, estos biocombustibles quedarían excluidos de los nuevos vehículos a partir de 2035, como se indicó previamente, salvo que en la normativa prevista para revisarse el próximo año se confirme la excepción que permite seguir comercializando motores de combustión interna propulsados exclusivamente con **combustibles neutros en carbono**, y que en esta consideración de combustibles neutros en carbono, entren los biocombustibles.

Además, en contraste, en sectores como el transporte aéreo y marítimo, que son más difíciles de electrificar, la UE sí ha establecido normativas específicas que avalan y promueven el uso de combustibles renovables, como el Reglamento ReFuelEU Aviation (2023/2405 [18]) y el FuelEU Maritime (2023/1805 [19]), ambos integrados también en el paquete legislativo “Fit for 55” para alcanzar los compromisos climáticos de 2030 y 2050. En concreto, estas normas evalúan los combustibles mediante la métrica Well-to-Wake (equivalente a Well-to-Wheel en transporte por carretera), considerando todas las emisiones desde la producción hasta la propulsión efectiva. En contraste, el reglamento de vehículos ligeros para transporte por carretera sigue usando la métrica Tank-to-Wheel, que mide únicamente las emisiones en el tubo de escape, independientemente de si el CO es de origen fósil o biogénico, lo que limita de momento la consideración de los combustibles renovables.

Esto plantea una reflexión importante: si los combustibles renovables son un pilar fundamental para el transporte marítimo y aéreo, ¿por qué no lo pueden ser también para la movilidad terrestre, pese a que en este sector la electrificación sea más viable técnica y económicamente?

Por ello, en este trabajo de fin de máster, se realizará una comparativa entre los combustibles renovables y la electricidad 100% renovable como opciones de descarbonización del transporte ligero por carretera, que abordará múltiples criterios. Previamente, es necesario conocer qué tecnologías de propulsión de vehículo son las más relevantes.

Tecnologías de propulsión de vehículos

Las tecnologías de propulsión de vehículos de carretera actualmente más extendidas en la Unión Europea son las siguientes:

- **ICEV (*Internal Combustion Engine Vehicle*, Motor de Combustión Interna) (TRL 9):** este tipo de vehículo está impulsado únicamente por un motor térmico, que funciona con combustibles fósiles (gas natural, GLP, gasolina o diésel) o con combustibles renovables como los biocombustibles o los e-fuels. Debido a su principio de funcionamiento basado en la combustión, generan emisiones por el tubo de escape, tanto de contaminantes locales como de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂, con un impacto global en el planeta. Aunque, como se comentó anteriormente, al repostar combustible renovable, las emisiones netas de GEI en el tubo de escape serían 0.
- **HEV (*Hybrid Electric Vehicle*, Vehículo eléctrico híbrido) (TRL 9):** combinan un motor de combustión interna con uno eléctrico, una batería en torno a 1-1,5 kWh y frenos regenerativos. Estos vehículos repontan el mismo combustible que los ICEV y no son enchufables, dado que la batería se recarga de forma automática mediante el motor de combustión y la recuperación de energía en la frenada [20]. No están exentos de emisiones en tubo de escape, al haber una combustión, aunque las de contaminantes locales se ven disminuidas respecto a los ICEV.

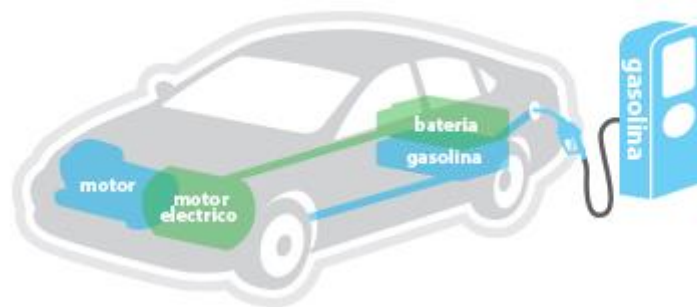


Figura 2. Esquema de un vehículo HEV. Fuente: Clean Vehicle [20].

La tendencia del mercado en los últimos años ha sido que los HEV se desarrollen mayoritariamente sobre la base de motores de gasolina, siendo los HEV diésel más minoritarios. En ambos casos, son también compatibles con los combustibles 100% renovables, sin necesidad de cambios en el motor.

- **PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, Híbrido Enchufable) (TRL 9):** es similar al HEV, pero con una batería de mayor capacidad y que, al contrario que el HEV, sí que requiere carga externa. Puede operar en modo eléctrico durante decenas de kilómetros, hasta más de 200 km en algunos casos. Reposta también gasolina para impulsar el motor de combustión interna.

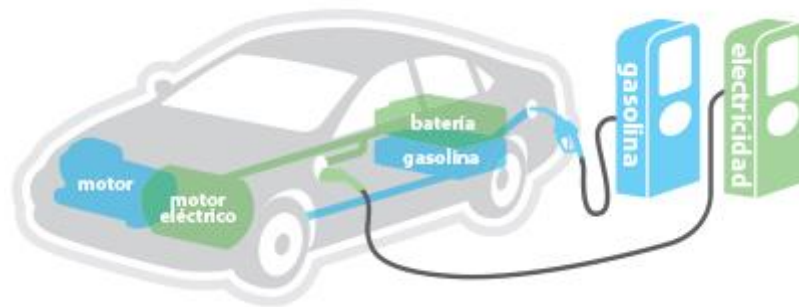


Figura 3. Esquema de un vehículo PHEV. Fuente: Clean Vehicle [20].

- **REEV (Range Extended Electric Vehicle, Vehículos eléctricos de batería de autonomía extendida) (TRL 9):** son vehículos híbridos enchufables con un motor eléctrico en serie con un generador térmico auxiliar que sólo se utiliza para producir electricidad. Pueden tanto cargarse desde la red eléctrica como utilizar su generador de gasolina para producir electricidad y ampliar la autonomía. La ventaja de este vehículo es la mayor autonomía, aunque es más complejo, caro y menos eficiente. Hay ejemplos comerciales de vehículos REEV, pero aun así ha tenido una escasa adopción comercial [21].
- **BEV (Battery Electric Vehicle, Vehículo Eléctrico de Batería) (TRL 9):** este vehículo es totalmente eléctrico, sin motor de combustión, impulsado por uno o más motores eléctricos. No consumen gasolina y son 0 emisiones en tubo de escape, tanto de gases contaminantes como de GEI. No por ello están exentos de otro tipo de emisiones como las partículas de desgaste de frenos y neumáticos, al igual que el ICEV y el HEV. Se cargan con electricidad y almacenan energía en sus baterías.

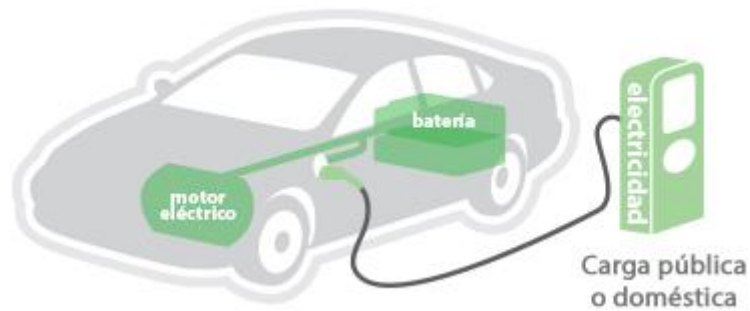


Figura 4. Esquema de un vehículo BEV. Fuente: Clean Vehicle [20].

- **FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle, Vehículo de Pila de Combustible) (TRL 7-8):** estos vehículos funcionan con hidrógeno, que se convierte en electricidad en la celda de combustible, obteniéndose agua como subproducto. Las emisiones de estos coches por tubo de escape son 0 y la recarga es más rápida que en los coches eléctricos, pero requiere una infraestructura especializada y con un despliegue aún muy bajo.

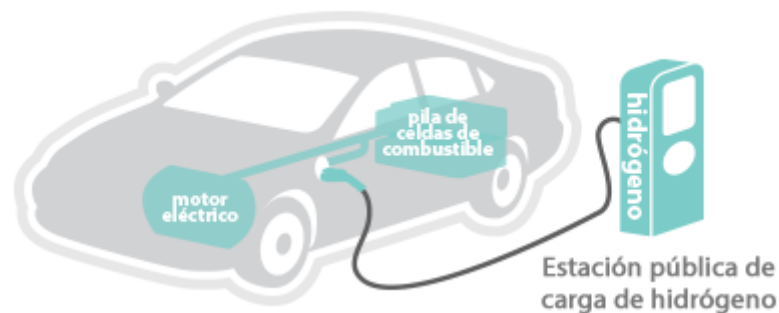


Figura 5. Esquema de un vehículo FCEV. Fuente: Clean Vehicle [20].

- **H₂ ICE (Vehículo de Motor de Combustión a Hidrógeno) (TRL 6-7):** utiliza un motor de combustión interna tradicional, pero quema hidrógeno en lugar de combustibles fósiles. Produce principalmente vapor de agua como emisión, aunque puede generar pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno (NO_x) por la alta temperatura de combustión. Permite aprovechar parte de la tecnología de motores y distribución existente, pero la eficiencia es menor que en los FCEV y requiere infraestructura de hidrógeno.

En el siguiente gráfico se muestran las ventas de vehículos en la UE en los últimos años, donde se puede observar un descenso de los ICEV y un estancamiento de los BEV y PHEV, especialmente en detrimento del aumento de los HEV [22]:

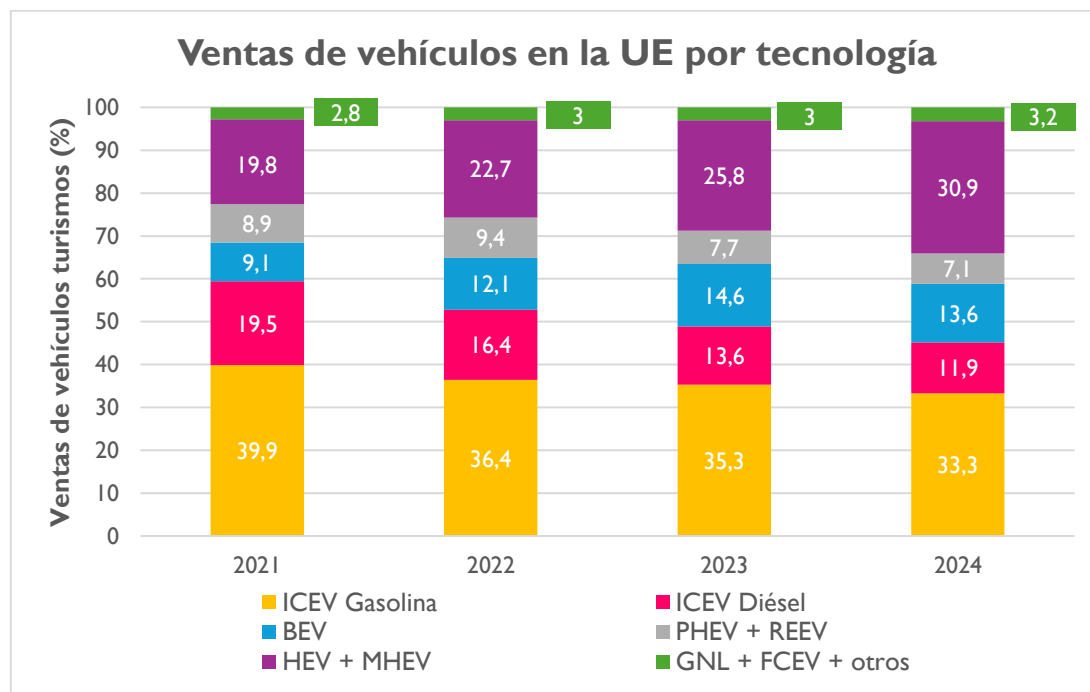


Figura 6. Ventas de vehículos turismos en la UE por tecnología. Fuente: elaboración propia a partir de ACEA [22].

En España, los datos de electrificación son ligeramente inferiores a la media europea, siendo el HEV la tecnología más vendida:

Tabla 2. Porcentaje de ventas de coches en España, por tecnología. Fuente: elaboración propia, a partir de OCU [23].

Tecnología	% ventas
HEV	41
ICEV Gasolina	31
PHEV	9,2
BEV	7,6
ICEV Diésel	5,6
Gas	5,1



Teniendo en cuenta que las 3 tecnologías de vehículo más desarrolladas son la HEV, la ICEV y la BEV, en este trabajo de fin de máster, se realizará una comparativa entre los coches de combustión con combustible 100% renovable (ICEV/HEV), y los eléctricos puros de batería (BEV) con electricidad 100% renovable. A la hora de analizar la opción del combustible renovable, en función de las tendencias del mercado y la información disponible en bibliografía, en algunos casos se utilizará un vehículo ICEV (*Internal Combustion Engine Vehicle*, Motor de Combustión Interna), y en otros un HEV (*Hybrid Electric Vehicle*, Vehículo eléctrico híbrido). En general, se considerará un ICEV para la opción diésel, y un HEV para la opción gasolina, siguiendo las tendencias del mercado.

Compatibilidad de los combustibles renovables con los vehículos del parque

Desde hace más de 10 años, se lleva suministrando en las estaciones de servicio europeas combustible renovable, inicialmente en mezcla con combustible convencional, y desde hace pocos años, también combustible renovable 100% puro en algunas estaciones de servicio. Por ejemplo, en España, en el Real Decreto 1085/2015 [24], se empezó a establecer un mínimo obligatorio de biocarburante en el cómputo anual de combustibles, inicialmente del 4,3%. En 2025, ya está en un 11,5% [25]. No obstante, este objetivo de biocarburantes no se refiere a la concentración máxima de un solo combustible vendido en las estaciones de servicio, sino al promedio ponderado de biocarburantes incorporados al total de gasolina y gasóleo suministrados.

Dicho esto, los combustibles renovables que se pueden encontrar actualmente en las estaciones de servicio para vehículos ligeros de carretera son los siguientes [26]:

Diésel

- **B7:** gasóleo que incorpora hasta un 7%v/v de biodiésel (FAME, ésteres metílicos de ácidos grasos, según la norma EN 14214 [27]) obtenido mediante transesterificación de aceites vegetales. Esta proporción, establecida por la norma europea EN 590, es el estándar obligatorio en todos los surtidores de la Unión Europea. Se trata del diésel convencional disponible en el mercado, por lo que todo el gasóleo de automoción comercializado en la UE es, como mínimo, B7 y compatible con la totalidad del parque de vehículos diésel.
- **B10:** no es de uso tan universal como el B7, aunque se aplica en algunos países de la UE de forma voluntaria. Este combustible en cambio no es compatible con todos los vehículos diésel.
- **B100:** se trata del FAME puro, aunque su uso es más restringido a flotas cautivas, y la mayoría de los motores diésel de los turismos no están adaptados a funcionar con este combustible.



- **HVO:** es un diésel renovable según la norma EN 15940 [28], que, al contrario que el FAME, es un combustible parafínico. Esto le confiere unas propiedades muy similares al diésel fósil, por lo que es compatible con todo el parque de vehículos diésel [29]. Desde hace algunos años, ya se ha empezado a vender HVO en cada vez más estaciones de servicio de Europa.

Todo combustible parafínico puro que cumpla la normativa EN15940 es compatible con todos los vehículos diésel. De momento, el único renovable que ya se vende y lo pueden suministrar todos los conductores de turismos diésel es el HVO, pero se espera que en un futuro próximo se puedan empezar a suministrar otros como el e-diésel u otros gasóleos producidos a partir de biomasa (BTL, *Biomass-to-Liquid*).

La etiqueta XTL (X-to-Liquid) presente en la boquilla donde se suministra el combustible en muchos vehículos diésel, indica que el fabricante ha homologado oficialmente el uso de combustibles parafínicos como el HVO. No obstante, muchos vehículos aptos para HVO no llevan esa etiqueta, ya que muchos fabricantes, como Stellantis, BMW, Volvo o Toyota [30], han autorizado su uso sin requerirla.

Gasolina

En el caso de la gasolina renovable, si esta cumple con la normativa EN228 [31] es compatible con el parque de vehículos actual. En las estaciones de servicio se puede encontrar lo siguiente:

- **E5:** esta lleva un 5% de bioetanol según la norma EN 15376, producido por fermentación de azúcares. Es compatible con todos los vehículos de gasolina.
- **E10:** en este caso, hasta el 10%, también compatible con la gran mayoría de los vehículos de gasolina desde la década del 2000 [26].
- **E85:** gasolina con hasta un 85% de bioetanol, pero no compatible con el parque de vehículos al no cumplir con la normativa EN228. Sólo es compatible con vehículos “flex-fuel” de gasolina, que tienen un despliegue más residual [32].
- **Gasolina 100% renovable:** Actualmente, la oferta de gasolina 100% renovable es muy limitada, habiendo comenzado su despliegue comercial en octubre de 2025, de momento en 20 estaciones de servicio de España [17].. Esta gasolina cumple con la normativa EN 228 y se produce mediante tecnologías de síntesis química a partir de materias primas renovables. Estas tecnologías permiten obtener hidrocarburos líquidos idénticos a la gasolina fósil y, en algunos casos, utilizan procesos similares a los empleados para producir diésel renovable. En la sección de velocidad de implementación se dan más detalles de estas tecnologías.



En este trabajo, de ahora en adelante y en los estudios comparativos de las distintas secciones, cuando se hable de combustible renovable, sea gasolina o diésel, se utilizará exclusivamente combustible 100% renovable. Y dentro de estos combustibles, cuando se hable de diésel o gasolina bio para referirse a un biocombustible, siempre será un biocombustible avanzado (listado en el Anexo IX A de la RED III), o residual (listado en el Anexo IX B de la RED III), siempre evitando los biocombustibles de primera generación, que compiten con usos alimentarios y están más limitados por la regulación vigente. En el caso del diésel bio (HVO), en todos los casos se usará UCO (*Used Cooking Oil*, Aceite de Cocina Usado) como materia prima, al ser la más usada actualmente. Esta materia prima está listada en el Anexo IX B.

Por otro lado, en las secciones donde se analicen RFNBOs, en todo caso se hablará de e-fuels, es decir combustibles producidos por CO₂ capturado e H₂ producido por electrólisis.

Requisitos y datos de partida

En este apartado, se van a indicar brevemente las partes en las que se estructurará el estudio y los vehículos comparados en cada una. En función del sentido crítico, la situación del mercado y la disponibilidad de información bibliográfica, en algunas secciones, para hacer la comparativa respecto al BEV, se cogerá un vehículo ICEV, un HEV, o ambos. Cuando se escoja un HEV, siempre será de gasolina, mientras que el ICEV por lo general será diésel, por lo comentado previamente.

En cuanto a los distintos escenarios tecnológicos, siempre que sea posible se considerarán los siguientes casos: para los vehículos de combustión, se analizará un caso con combustible fósil, un caso con biocombustible y un caso con e-fuel; mientras que, para los vehículos eléctricos de batería (BEV), se evaluarán al menos 3 escenarios: un caso en el que la batería se fabrica en China pero el vehículo circula en la UE, un caso en el que la circulación se realiza con electricidad 100 % renovable, y un caso en el que tanto la fabricación de la batería como la circulación del vehículo ocurren en la UE.

En todo caso, para mantener la homogeneidad en el trabajo, los vehículos turismos del estudio son siempre modernos del Segmento C, y sus consumos energéticos son los siguientes:

- ICEV Diésel: 4,98 L/100 km, según el IDAE [33].
- HEV Gasolina: 5,55 L/100 km, también según el IDAE.
- BEV: 15,1 kWh/100 km, en este caso según estimaciones de FEV [34].



Por otro lado, los tamaños de batería de los HEV y los BEV son siempre los mismos, también en base a datos del IDAE: 1,5 kWh para el HEV, y 63 kWh para el BEV. La batería considerada siempre es una NMC (batería de iones de litio que utiliza un cátodo formado por níquel, cobalto y manganeso), y la vida útil de los vehículos es 200.000 km, según el requerimiento de durabilidad para los sistemas de control de emisiones contaminantes que establece la normativa Euro 7 [35], y que se ha tomado en este trabajo como referencia de vida útil del vehículo completo.

Siempre que sea posible, se realizará una comparación entre la situación actual en 2025 y la proyectada para el horizonte temporal de 2035. Siguiendo las tendencias del mercado, para ese año sólo se analizará vehículo eléctrico frente a híbrido de gasolina, al esperarse un papel cada vez más marginal del diésel [22] . Para este año, según FEV, se consideran los siguientes consumos de energía y tamaños de batería:

- HEV: 2 kWh de batería; 3,8 L/100km.
- BEV: 100 kWh de batería; 12,3 kWh/100km.

En el horizonte temporal a 2035, en este trabajo, excepto en el apartado de eficiencia, sólo se ha variado el consumo energético de los vehículos, el tamaño de las baterías y el mix eléctrico de los países. Aunque es posible que afectasen otros factores que, por falta de información bibliográfica, no se han tenido en cuenta como las mejoras en el proceso de producción de los combustibles renovables y las baterías de los vehículos, y el reciclado de éstas últimas.

Con estos datos de partida, las distintas secciones en las que se divide el estudio y las tecnologías comparadas en cada uno son las siguientes:

Tabla 3. Secciones del estudio y datos de partida. Parte I.

Sección	Escenario 2025	Escenario 2035
Emisiones GEI	ICEV: Diesel Fósil Diesel Bio e-Diésel HEV: Gasolina Fósil Gasolina Bio e-Gasolina BEV: Batería China, circulación UE Batería China, circulación 100% renovable Batería China, circulación Polonia Batería UE, circulación UE	HEV: Gasolina Fósil Gasolina Bio e-Gasolina BEV: Batería China, circulación UE Batería China, circulación 100% renovable Batería UE, circulación UE
Emisiones contaminantes locales	ICEV: Diesel Fósil Diesel Bio HEV: Gasolina Fósil Gasolina Bio BEV: no aplica	-
Consumo de agua	ICEV: Diesel Fósil Diesel Bio e-Diésel HEV: Gasolina Fósil Gasolina Bio e-Gasolina BEV: Batería China, circulación UE Batería China, circulación 100% renovable Batería China, circulación España Batería UE, circulación UE	HEV: Gasolina Fósil Gasolina Bio e-Gasolina BEV: Batería China, circulación UE Batería China, circulación 100% renovable Batería China, circulación España Batería UE, circulación UE
TCO	HEV: Gasolina Bio BEV: Batería China, circulación España	HEV: Gasolina Bio BEV: Batería China, circulación España

A continuación de ello, se realizará una sección de seguridad de suministro, donde se estudiará por un lado la abundancia del recurso energético, la eficiencia en el uso de la energía, y el uso de materiales escasos. En el primer caso, se analizará la disponibilidad de biomasa para la producción de combustibles renovables, mientras que en los otros 2 apartados se realizará también una comparativa de coche eléctrico frente a coche de combustión, con las siguientes tecnologías:

Tabla 4. Secciones del estudio y datos de partida. Parte 2.

Sección	Escenario 2025	Escenario 2035
Eficiencia	-ICEV: HVO -HEV: e-Gasolina -BEV: Batería no aplica, circulación UE	-ICEV: HVO -HEV: e-Gasolina -BEV: Batería no aplica, circulación UE
Materiales críticos	-HEV: Gasolina Fósil e-Gasolina -BEV (batería no aplica) Circulación UE Circulación 100% renovable Circulación España	-HEV: Gasolina Fósil e-Gasolina -BEV (batería no aplica) Circulación UE Circulación 100% renovable Circulación España

Se cerrará el trabajo comparativo con una sección sobre la madurez tecnológica de cada tecnología, otra sobre la comodidad para el usuario final, y con otra sobre la velocidad de implantación, donde se analizará la infraestructura de suministro. Todo ello previo a una sección de consideraciones finales del análisis comparativo.

Emplazamiento

En este caso, al tratarse de un estudio técnico y no un proyecto clásico de ingeniería, no existe un emplazamiento físico concreto. No obstante, el ámbito geográfico del estudio se circunscribe, en la medida de lo posible, a Europa, por ser el eje fundamental de toda la normativa relacionada con el Net Zero y el lugar donde se concentran la mayoría de estudios e informes utilizados como referencia en este trabajo. En algunos casos, como ejemplo de país europeo, se pondrá el foco en España.



Normas y Bibliografía Clave

La base central de trabajo se ha basado en un paquete de normativas fundamentales que regulan el transporte por carretera, y de las cuales acaban dependiendo otros decretos u ordenaciones que afectan a la discusión más adelante en la sección de TCO, infraestructura u hoja de ruta. Estas son, principalmente: la Directiva de Energías Renovables (RED II [15] y III [7]), y el Reglamento de CO₂ de vehículo ligero (Regulación 2023/851 [8]), que ya se han introducido en la sección de justificación, por lo que no se entrará en más detalle. Por otro lado, en la sección de emisiones contaminantes se presentarán los detalles de otra normativa importante como es el Reglamento Euro 7 (2024/1257 [35]), que es clave en este ámbito del estudio.

Además de estas normativas europeas, que constituyen la base y el marco de justificación del trabajo, se han consultado informes y publicaciones de organismos de referencia, cuyas aportaciones han resultado relevantes para el desarrollo del estudio. Algunas de ellas son:

- El estudio del impacto ambiental en ciclo de vida para combustibles alternativos de la consultora Ricardo (2020) [36].
- La página web del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) [33], de donde se ha consultado información clave relativa a los consumos promedio de combustible y tamaños de batería de los vehículos del parque.
- La página web de la IEA (Agencia Internacional de la Energía) [37], y un informe de ENTSOE (2024) (Red Europea de Gestores de Redes de Transporte de Electricidad) [38], donde se ha consultado información sobre los factores de emisión de las redes eléctricas de los países.
- El informe Well-to-Wheel para combustibles de automoción (2020), del JEC (JRC -*Joint Research Centre*, Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, Eucar y CONCAWE), de donde se han obtenido factores de emisión de diferentes combustibles, además de densidades y poderes caloríficos.
- La página web de CORES (Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos) [39], que proporciona estadísticas detalladas sobre consumo y producción de productos petrolíferos.
- El informe de ConcaWE (2024) [40] sobre combustibles sintéticos y sus expectativas de desarrollo hasta 2050.
- El último informe del ICCT [41] (*International Council on Clean Transportation*, Consejo Internacional para el Transporte Limpio) sobre descarbonización del sector de automoción por carretera, de septiembre de 2025.



- El estudio sobre TCO (*Total Cost of Ownership*, Coste Total de Propiedad) de vehículo híbrido y eléctrico, preparado para Repsol por la consultora FEV [34].
- Dos estudios preparados para Repsol por la consultora Sphera: uno sobre consumo de agua [42], y otro sobre materiales críticos [43], en vehículos con motor de combustión y vehículos eléctricos.
- El estudio de colaboración entre Seat y Repsol [44] (2025) de emisiones de contaminantes locales de vehículos Euro 6.



Análisis tecno-económico de las soluciones de descarbonización del transporte ligero por carretera

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en ciclo de vida

Contexto

Como se explicó anteriormente, la regulación actual de vehículo ligero de carretera, responsable del 11% de las emisiones de GEI en la UE [12], sólo mide las emisiones de CO₂ en tubo de escape, de las que están exentas los vehículos eléctricos, sin considerar otras fases de la cadena de valor del vehículo [8]. Al ser la neutralidad climática el objetivo de la UE para 2050, en vez de las cero emisiones, la métrica adecuada para comparar el impacto medioambiental de las distintas opciones de descarbonización del transporte debería de ser la del ciclo de vida, que cubre todas las etapas: fabricación del vehículo, fabricación de la batería, fabricación de la energía (“Well-to-Tank”), uso (“Tank-to-Wheel”), mantenimiento y fin de vida útil.

Esta metodología resulta especialmente útil cuando las alternativas a comparar difieren en el tipo de energía consumida en el vehículo, el sistema de propulsión y el proceso de fabricación, independientemente del lugar geográfico donde se realicen. Esto es relevante porque los GEI tienen un efecto acumulativo a escala global, por lo que el lugar concreto de emisión no afecta al impacto climático total [45].

Antecedentes

En cuanto a la información bibliográfica, existen pocos estudios que comparen las emisiones de CO₂ en ciclo de vida considerando el papel de los combustibles 100% renovables. Por ejemplo, un informe de la consultora Ricardo [36] analiza distintas alternativas de descarbonización desde la métrica de ciclo de vida, pero sólo consideran mezclas de este tipo de combustibles, sin evaluar opciones 100% renovables. Otro informe es el de JEC [46], que sí analiza combustibles renovables puros (es decir, al 100%), pero bajo la métrica WtW, no de ciclo de vida.



La única fuente que se ha encontrado que analice combustibles renovables desde una perspectiva de ciclo de vida es una herramienta de Concawe realizada por IFPEN [47], que permite seleccionar diferentes escenarios y tecnologías de vehículo para un escenario actual, y cuyos resultados se compararán con los elaborados en este trabajo.

Por otro lado, los estudios que analizan en ciclo de vida a los vehículos eléctricos y a los de combustión con combustible fósil, como el de Messagie [48] o el de Hall [49] emplean criterios e hipótesis distintas (tamaño de batería, tipo de vehículo, vida útil del vehículo, factor de emisión de la batería, etc.), que complican realizar una comparativa equitativa entre ellos.

Metodología y criterios aplicados

Teniendo en cuenta las limitaciones identificadas en los estudios anteriores y la necesidad de evaluar todas las etapas de ciclo de vida, esta sección describe la metodología utilizada para el análisis de las emisiones de GEI. Como se comentó anteriormente, se toma como vehículo de referencia para el estudio un turismo de tamaño mediano, del segmento C (como, por ejemplo, el Volkswagen Golf, el Renault Mégane o el Opel Corsa). Y la vida útil del vehículo considerada es de 200.000 km.

Se van a analizar las siguientes alternativas:

Tabla 5. Alternativas de descarbonización escogidas en el análisis de emisiones de GEI en ciclo de vida. Fuente: elaboración propia.

	Combustible / Electricidad	Fabricación Batería	Escenario temporal
ICEV – Diesel	- Combustible convencional (11,5%e/e bio) - Biocombustible HVO (a partir de UCO). - RFNBO (e-diesel)	-	2025
HEV – Gasolina	- Combustible convencional (11,5%e/e bio) - Biocombustible - RFNBO (e-gasolina)	China	2025, 2035
BEV	• Mix eléctrico UE	China	2025, 2035
		UE	2025, 2035
	• Mix eléctrico Polonia	China	2025
	• Mix eléctrico 100% renovable	China	2025, 2035

Se incluyen el caso con electricidad 100% renovable y el caso de Polonia con el objetivo de abarcar un rango amplio de escenarios de mix eléctrico, desde uno basado exclusivamente en renovables hasta otro con elevada intensidad de emisiones de GEI. El caso en el que la batería del vehículo se fabrica en la UE se analiza con el fin de coger otro entorno geográfico distinto a China para la fabricación de la batería, algo menos habitual, actualmente. Según BNEF [50], más del 80% de la fabricación de celdas y componentes clave para las baterías de los vehículos eléctricos se fabrican actualmente en China.

Además, se calcula un caso para un supuesto 2035 en el que se cambian los consumos de los vehículos, los tamaños de batería y las emisiones de GEI de las redes eléctricas de los países, por lo que cambiarían las emisiones en la fabricación de la batería, fabricación de la energía y uso. Para este caso, sólo se comparará el HEV de gasolina respecto al BEV, siguiendo las tendencias del mercado, como se comentó anteriormente. Y dentro del BEV, se analizan las mismas alternativas, excepto la opción de Polonia, al no disponer de la estimación de las emisiones en su mix eléctrico en 2035.

Fabricación del vehículo

Para esta primera parte del estudio, se toma información del estudio de la consultora Ricardo [36], de 2020, que reporta el dato en gramos de las emisiones de GEI de las 3 alternativas, sin contar la batería, siendo muy similares:

Tabla 6. Emisiones de GEI en la fabricación del vehículo. Fuente: Ricardo.

Alternativa	Emisiones GEI (g)
ICEV	8.938.607
HEV	8.966.096
BEV	8.814.654

A diferencia de la fabricación de la batería, la del vehículo completo es menos sensible a la localización geográfica, dado que se trata de un proceso más estandarizado y con menor necesidad energética por kilogramo de material producido.

Fabricación de la batería

Esta etapa forma parte del ciclo de vida de los BEV y de los HEV de gasolina. La tipología de batería escogida es la NMC. En la siguiente tabla se muestran los tamaños de batería de referencia empleados y las fuentes.

Tabla 7. Tamaños de batería de referencia para HEV y BEV.

Alternativa	2025		2035	
	Tamaño [kWh]	Fuente	Tamaño [kWh]	Fuente
HEV	1,5	FEV [34]	2	FEV [34]
BEV	63	IDAE [28]	100	FEV [34]

Para calcular las emisiones en esta etapa, se necesitan otros 3 datos:

- Las **emisiones en el upstream de los materiales de la batería** (U), es decir, las emisiones en la extracción de las materias primas de la batería y el procesamiento de estos materiales. Este dato se obtiene de un informe de IVL [51], que lo reporta en 59 kg CO₂/kWh.
- La **necesidad de energía en la fabricación de la batería** (F), que en el mismo informe se reporta un valor de 170 MJ/kWh.
- Las **emisiones de GEI del mix eléctrico del país en el que se fabrica la batería** (E), que son las siguientes:

Tabla 8. Emisiones en la red eléctrica, sin considerar pérdidas de transporte y distribución.

País	2025 ²		2035	
	Emisiones [gCO ₂ /kWh]	Fuente	Emisiones [gCO ₂ /kWh]	Fuente
China	662,7	IEA [52]	269	IEA [53]
UE	218,9	ENTSO-E [38]	54	IEA [53]

A estos datos habría que añadirles las pérdidas generales de la red eléctrica, que incluyen tanto transmisión como distribución, estimadas en un 4,7% para el caso de China [54], y un 8% para la UE [55]. Se considera que las pérdidas se mantienen igual en 2035. Con ello, el dato final de las emisiones es el siguiente:

Tabla 9. Emisiones en la red eléctrica, considerando pérdidas de transporte y distribución.

País	2025 ³	2035
	Emisiones [gCO ₂ /kWh]	Emisiones [gCO ₂ /kWh]
China	693,8	281,6
UE	236,4	58,3

² En el caso de China, los datos corresponden a 2023, mientras que los de la UE, a 2024. Son los datos más actualizados que se han encontrado.

³ En el caso de China, los datos corresponden a 2023, mientras que los de la UE, a 2024. Son los datos más actualizados que se han encontrado.

Con estos datos, las emisiones en la fabricación de la batería (Y) se calcularían de la siguiente forma,

$$Y (gCO_2e) = B \cdot \left(U + F \cdot \frac{\frac{E}{3,6 \text{ MJ/kWh}}}{1000 \text{ g/kg}} \right) \cdot 1000 \text{ g/kg} \quad (1)$$

Donde:

- Y = Emisiones en la fabricación de la batería (gCO_{2e}).
- B = Tamaño de la batería (kWh).
- U = Emisiones upstream (kgCO_{2e}/kWh).
- F = Energía necesaria en fabricación (MJ/kWh).
- E = Emisiones del mix eléctrico (gCO_{2e}/kWh).

Fabricación de la energía (Emisiones “Well to Tank”) y Uso (Emisiones “Tank to Wheel”)

Para calcular estas emisiones, primero es necesario partir de los consumos energéticos de cada alternativa.

Se emplean datos de homologación según el ciclo WLTC, que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 10. Consumos energéticos para cada una de las 3 alternativas, en 2025 y 2035.

Alternativa	2025		2035	
	Consumo [L/100km ó kWh/100km]	Fuente	Consumo [L/100km ó kWh/100km]	Fuente
ICEV-Diésel	4,98	IDAE [33]	-	-
HEV-Gasolina	5,55	IDAE [33]	3,8	FEV [34]
BEV	15,1	FEV [34]	12,3	FEV [34]

Se estima que la gasolina y el diésel consume aproximadamente lo mismo que el combustible convencional, de acuerdo con AVL [56].

Para la gasolina y el diésel, también es necesario utilizar su densidad y su poder calorífico:

Tabla 11. Densidades y poderes caloríficos del diésel y la gasolina.

Combustible	Densidad		Poder calorífico	
	Valor [kg/L]	Fuente	Valor [MJ/kg]	Fuente
Diésel	0,832	JEC [46]	43,1	JEC [46]
Gasolina	0,743	JEC [46]	43,2	JEC [46]

De esta forma, se obtiene el consumo en MJ/km para los 3 tipos de vehículos:

Tabla 12. Consumo energético final (MJ/km) de las 3 alternativas, en 2025 y 2035.

Alternativa	Consumo [MJ/kg]	
	2025	2035
ICEV-Diésel	1,79	-
HEV-Gasolina	1,78	1,22
BEV	0,54	0,44

También es necesario considerar el porcentaje de combustible renovable incorporado para los casos de diésel o gasolina fósil. Se coge el dato del 11,5%/e que exige la normativa española como mínimo obligatorio de biocarburante en el cómputo anual de combustibles en 2025 [25]. Para 2035 se estima un incremento hasta el 12 %/e, correspondiendo este valor al objetivo real de 2026, que es el último fijado hasta ahora por el Real Decreto. No obstante, el Ministerio ha propuesto recientemente elevar este objetivo en 2026 hasta el 14 % [57]. Dado que esta propuesta se publicó cuando el presente trabajo ya estaba en fase final de redacción, los cálculos presentados se mantienen con el valor previamente establecido del 12%.

A continuación, se estima el factor de emisión Well to Tank (WtT, en la fabricación del combustible) y Tank to Wheel (TtW, en el uso de ese combustible, es decir lo que se emite en tubo de escape) de la fracción fósil y la renovable de cada alternativa.

En el caso del factor de emisión TtW de la fracción fósil, JEC [46] lo reporta en 73,2 gCO₂/MJ para el vehículo diésel, y 73,4 gCO₂/MJ para la gasolina. Dado que el factor de emisión Well to Wheel (es decir la suma de WtT y TtW) para el combustible fósil, según la RED [58], es de 94 gCO₂/MJ, el factor de emisión WtT de la fracción fósil es de 20,8 gCO₂/MJ para el diésel, y 20,6 para la gasolina. Estas consideraciones se considera que se mantienen en 2035.

Tabla 13. Factores de emisión para los combustibles fósiles.

Alternativa	Factor de emisión TtW (gCO ₂ /MJ)	Fuente	Factor de emisión WtW (gCO ₂ /MJ)	Fuente	Factor de emisión WtT (gCO ₂ /MJ)
Diésel fósil	73,2	JEC [46]	94	RED [58]	20,8
Gasolina fósil	73,4	JEC [46]	94	RED [58]	20,6

En cuanto a la fracción renovable, el factor de emisión TtW es 0, al estarse emitiendo un CO₂ que previamente se retiró de la atmósfera en la fase de crecimiento de la biomasa, tal y como se recoge en la RED. El factor de emisión WtT por otro lado, varía en función de la alternativa, que se asume igual en 2025 y 2035:

Tabla 14. Factores de emisión para los distintos combustibles renovables considerados.

Alternativa	Factor de emisión TtW (gCO ₂ /MJ)	Factor de emisión WtT (gCO ₂ /MJ)	Fuente	Comparador fósil (gCO ₂ /MJ)	Reducción de emisiones WtW (%)
Biodiésel presente en mezcla con el diésel fósil (producido a partir de UCO)	0	8,3	JEC [46]	94	91,2
HVO (a partir de UCO)	0	11,1	JEC [46]	94	88,2
e-Diésel y e-Gasolina	0	5	IEA [59]	94	94,7
Bioetanol presente en mezcla con la gasolina fósil (producido a partir de remolacha)	0	18,8	JEC [46]	94	80,0
Biogasolina	0	9,67	Eionet [60]	94	89,7



Como se puede ver, en todos los casos se cumple con creces el requisito de reducción de emisiones WtW que impone la RED tanto a biocombustibles (50, 60 o 65% respecto al comparador fósil de 94 gCO₂/MJ, en función de la antigüedad de la planta) como a RFNBO (70%), que se indicó en la *Tabla 1*.

Con todos estos datos, se pueden calcular las emisiones WtW en g/km, como la suma de las WtT y las TtW, considerando el % de la fracción renovable y la fósil y multiplicando finalmente cada factor de emisión por el consumo.

En el caso de los BEV, las emisiones TtW son también 0, al no haber emisiones directas en tubo de escape, pero las emisiones WtT dependerán de la fuente de producción de energía eléctrica. Esto es equivalente a las emisiones de GEI en el mix eléctrico del país donde se fabrica la batería, que se explicó previamente, pero en este caso habría que tener en cuenta el país en el que se produce la recarga eléctrica del vehículo. Los 3 casos analizados son la electricidad promedio en la Unión Europea, un caso 100% renovable y Polonia. Las emisiones asociadas a la red eléctrica de la UE, a 2025 y 2035, se mostraron en la *Tabla 9*.

Según la misma fuente, ENTSO [38], las emisiones en el mix eléctrico de Polonia son de 662,1 gCO₂/kWh, con un 6,1% de pérdidas generales de transmisión y distribución [61]. Por otro lado, las del caso con electricidad 100% renovable son 0, al no haber emisiones directas en la producción de electricidad con estas tecnologías⁴. Como se comentó anteriormente, en 2035 no se analiza la opción polaca, al no disponer de la estimación de las emisiones en su mix eléctrico en 2035.

Mantenimiento y Fin de vida útil

Por último, las emisiones de mantenimiento y vida útil se basan en datos del informe de la consultora Ricardo [36]. De nuevo, al igual que las emisiones en la fabricación del vehículo, las diferencias entre los eléctricos y los de combustión no son reseñables, siendo las emisiones en fin de vida útil negativas debido al reciclaje asociado a distintos componentes del vehículo. En el caso de los vehículos eléctricos, el reciclaje de las baterías es especialmente relevante, ya que permite recuperar materiales de alto valor, contribuyendo a la economía circular y reduciendo la presión sobre recursos. No se hace estimación de variaciones para 2035 en esta parte, pero su consideración futura podría mejorar aún más la sostenibilidad de los BEV.

⁴ Sí que podría tener emisiones directas la electricidad producida a partir de geotermia, pero su contribución en la producción de electricidad en el mix europeo es muy residual. De todas formas, las emisiones con geotermia no son nulas, pero sí muy bajas, menores al carbón o al gas.



Los datos del informe son los siguientes:

Tabla 15. Emisiones en mantenimiento y fin de vida útil. Fuente: Ricardo.

Alternativa	Emisiones GEI [g]	
	Mantenimiento	Fin de vida
ICEV-Diésel	1.447.529	-1.735.551
HEV-Gasolina	1.098.459	-1.832.505
BEV	819.512	-2.362.213

La Directiva 2000/53/CE [62], es la norma principal que regula el reciclado y tratamiento de vehículos al final de su vida útil, estableciendo objetivos de recuperación y reciclaje de materiales: un 95 % de recuperación y al menos 85 % de reciclaje o valorización, de los cuales un 80 % debe ser reciclado. Esto implica que, aunque la mayor parte de los componentes del vehículo se recicla, no toda la batería de un BEV queda cubierta por la normativa, quedando algunos materiales fuera de los objetivos obligatorios. La fracción de batería que no se recicla se gestiona como residuo controlado, debido tanto a la dificultad de extraer eficientemente los metales de mayor valor como al tratamiento seguro de electrolitos y otros materiales de menor interés.

Presentación y Análisis de Resultados

A continuación, se adjunta primero una gráfica comparativa de las emisiones de GEI para las 10 alternativas comentadas, para 2025. Se muestran también las emisiones por etapa:

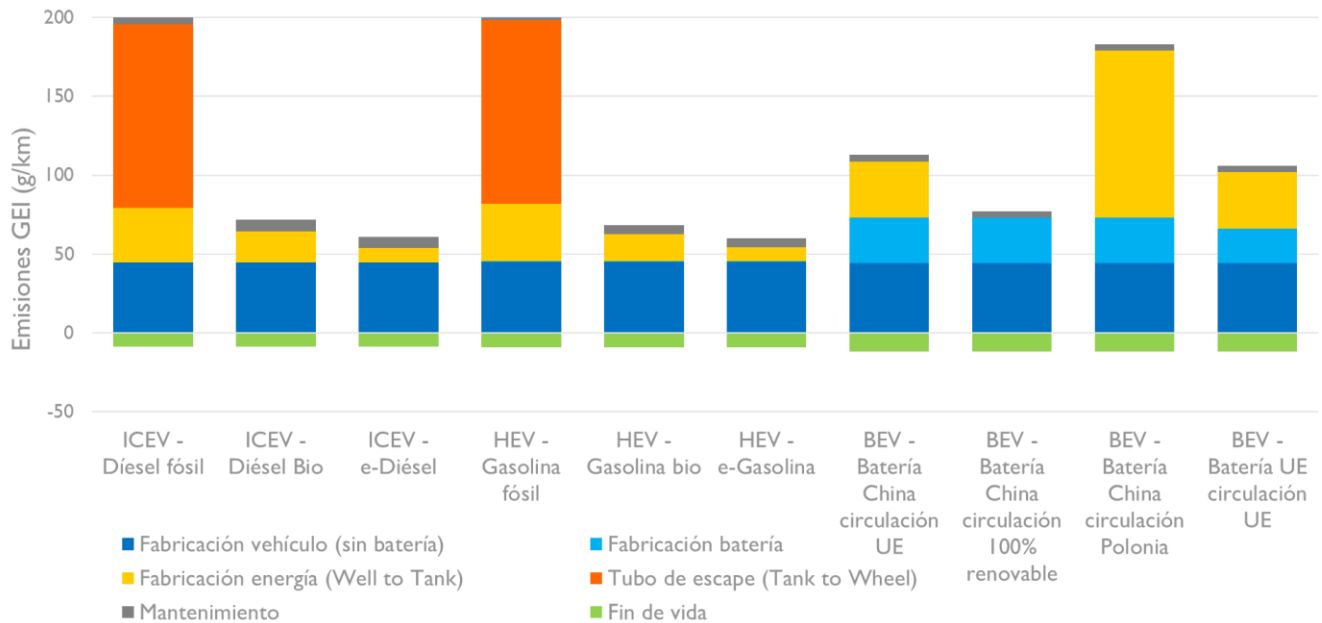


Figura 7. Emisiones de GEI en ciclo de vida para distintas alternativas de descarbonización, en 2025. Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que la opción del combustible renovable es la que menos emisiones tiene en el ciclo de vida; concentrando la diferencia con el eléctrico principalmente en las emisiones asociadas a la fabricación de la batería, y en la fabricación de la energía, donde el aún reseñable porcentaje de electricidad fósil de la mayoría de las redes eléctricas provoca unas emisiones considerables. Incluso en el caso con una circulación con electricidad 100% renovable, pese a que las emisiones asociadas a la fabricación de la energía son cero, las emisiones en ciclo de vida siguen siendo mayores a las de los combustibles renovables.

Dentro de los combustibles renovables, la opción del combustible sintético mejora a la opción bio tanto para gasolina como diésel. Y entre emplear un vehículo ICEV y un HEV las diferencias no son reseñables, al ser las emisiones en la fabricación de la batería del HEV (1,5 kWh) prácticamente despreciables.



Por tanto, el foco debería estar en aumentar al máximo posible la cuota de electricidad renovable en las redes eléctricas con el fin de que el vehículo eléctrico no se vea penalizado en esta categoría en comparación con los vehículos de combustión con combustible renovable, sobre todo en China, país donde mayoritariamente se fabrican los vehículos eléctricos, y cuya penetración de energía renovable en el mix es aún menor al 40% [38].

Esto último es especialmente relevante sobre todo porque, como se puede ver, las emisiones asociadas a la fabricación de la energía en los casos bio o e-fuel son muy bajas y las de tubo de escape son 0, computando sólo la fabricación del vehículo en más de un 75% de todas las emisiones en ciclo de vida para estas alternativas.

Incluso en la UE, con una penetración de energía renovable en el mix eléctrico cada vez más cercana al 50%, las emisiones en ciclo de vida de un supuesto vehículo fabricado y vendido en nuestro continente saldrían mayores a las de los combustibles renovables a día de hoy.

Como conclusión, se puede decir que, cogiendo China como país de fabricación de los vehículos eléctricos, en caso de que el vehículo circule en un país con un mix eléctrico cercano al 100% renovable, las emisiones en ciclo de vida serían similares a las de un ICEV con combustible 100% renovable; pero en cambio, si este vehículo se recarga en un país con un mix eléctrico con poca penetración renovable, como Polonia (30-40% renovable), las emisiones se asemejarían a las de un ICEV con combustible fósil, convirtiendo al BEV en una opción no acorde con los objetivos climáticos de reducción de emisiones.

La herramienta de Concawe [47] no permite seleccionar exactamente los mismos tamaños de batería y km de vida útil que en este trabajo. No obstante, usando datos similares (2 kWh para el HEV, 60 kWh para el BEV, 187.500 km de vida útil y considerando que el coche diésel es un HEV en lugar de un ICEV), se puede estimar que la tendencia obtenida es comparable: las opciones fósiles superan los 200 g CO₂/km, el BEV, asumiendo batería y circulación en la UE, se sitúa en torno a 100 g CO₂/km, y las alternativas con e-fuels apenas superan los 50 g CO₂/km. La opción con HVO también se sitúa por encima de los e-fuels, aunque ligeramente mayor que la estimación de este trabajo, con unos 95 g CO₂/km.

En la estimación cogida para 2035, en cambio, con una reducción considerable de las emisiones en los mixes eléctricos de los países, la imagen quedaría de la siguiente forma:

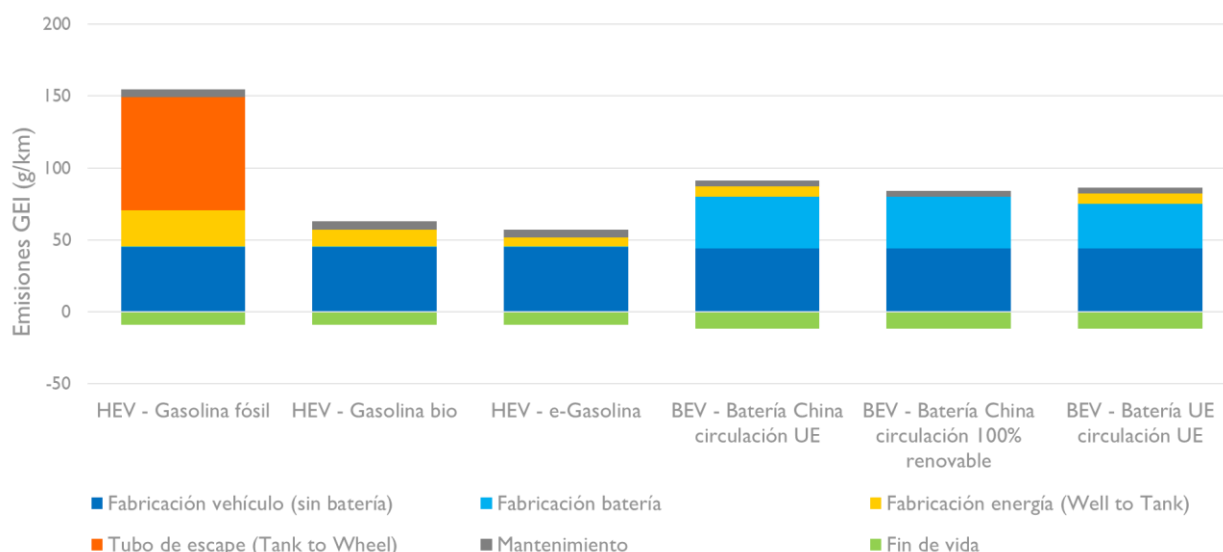


Figura 8. Emisiones de GEL en ciclo de vida para distintas alternativas de descarbonización, en 2035. Fuente: elaboración propia.

Tabla 16. Comparativa de las emisiones de GEL entre 2025 y 2035 (g/km).

Alternativa	2025	2035
ICEV - Diésel fósil	193,5	-
ICEV - Diésel bio	63,1	-
ICEV – e-Diésel	52,2	-
HEV - Gasolina fósil	193,9	145,5
HEV - Gasolina bio	59,1	53,7
HEV – e-Gasolina	50,8	48,0
BEV - Batería China circulación UE	101,0	79,7
BEV - Batería China circulación 100% renovable	65,3	72,5
BEV - Batería China circulación Polonia	171,4	-
BEV - Batería UE circulación UE	94,2	74,4

Se observa que, en efecto, la descarbonización progresiva de las redes eléctricas de los países reduce de forma paulatina las emisiones en ciclo de vida de los vehículos eléctricos, pese a que siguen por encima del resultado de los combustibles renovables.



Dado que las emisiones derivadas de la fabricación de la energía se han equiparado a las de las opciones de combustión, ahora la diferencia es debida exclusivamente a la fabricación de la batería, la cual mantiene una huella considerable, especialmente al incrementarse su capacidad respecto a 2025. Esto último se observa en el caso de circulación con electricidad 100% renovable, cuyas emisiones aumentan en 2035 respecto a 2025. Lo que pone de relieve que el aumento del tamaño de las baterías puede resultar contraproducente desde la perspectiva de las emisiones en el ciclo de vida.

Conclusiones

En conclusión, se observa que la métrica más adecuada para comparar tecnologías de propulsión es la del ciclo de vida, al ofrecer una visión más holística y aséptica que la métrica TtW, ya que incluye todas las etapas del vehículo, desde su fabricación hasta su fin de vida útil.

Los resultados muestran que, bajo esta métrica, las emisiones de GEI de los vehículos de combustión con combustible renovable son similares a las de los vehículos eléctricos alimentados con electricidad 100% renovable. Y cuando se hace la comparativa cogiendo electricidad de la red, las emisiones de los de combustión con combustible renovable siempre resultan menores, debido al peso de la generación fósil en la red.

Además, en cuanto a la contribución de cada tecnología, se puede observar que las emisiones de los vehículos de combustión se concentran en la fase de uso (si usan combustible fósil), mientras que las de los eléctricos se concentran en la fabricación de la batería y la producción de electricidad. Esto demuestra que centrar el análisis únicamente en las emisiones en tubo de escape, como establece actualmente el Reglamento de vehículo ligero [8] limitando a 0 g CO₂/km las emisiones de los vehículos para 2035, subestima el impacto total de las emisiones de GEI.

Emisiones contaminantes locales

Contexto

A diferencia de los gases de efecto invernadero, cuyo impacto es global, las emisiones de contaminantes locales tienen efectos a nivel local o regional, resultando especialmente perjudiciales para la salud humana y los ecosistemas. En particular, las principales emisiones contaminantes (g/km o #/km) son monóxido de carbono (CO), hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) que incluyen monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂) y, finalmente, partículas medidas en masa (PM) y en número (PN).

El sector transporte y, en concreto el transporte por carretera, es uno de los focos emisores de este tipo de sustancias contaminantes, en especial por el tubo de escape de los vehículos con motor de combustión. Según la Agencia Europea de Medioambiente (*European Environment Agency*, EEA [63]), este sector contribuye hasta en un 30% del total de emisiones de NO_x, y en torno al 20% de CO y PM 2,5 (partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrómetros).

A nivel técnico, existen diferentes soluciones para reducir la emisión de especies contaminantes a la atmósfera procedentes del proceso de combustión de los vehículos con motor térmico. Estas soluciones se pueden englobar en tres tipologías:

- **Calidad del combustible.** Las especificaciones técnicas de los combustibles, reguladas bajo el CEN (Comité Europeo de Normalización) han ido evolucionando a lo largo de los años para alinearse, entre otros aspectos, con la tecnología del motor en el control de emisiones, tanto para evitar la formación de estos contaminantes [64], como para posibilitar la incorporación de sistemas de control de emisiones contaminantes en el motor.
- **Tecnologías que minimizan la formación de estas especies contaminantes en el motor de combustión**, tales como diseños de la cámara de combustión, estrategias avanzadas de inyección de combustible o sistemas de recirculación de gas de escape.
- Tecnologías que reducen las emisiones una vez producidas en el motor de térmico y antes de ser liberadas a la atmósfera a través del tubo de escape. Estas tecnologías las componen los **sistemas de post-tratamiento**.

Desde un punto de vista regulatorio, para mitigar el impacto del transporte por carretera en la calidad del aire de las ciudades, la UE implementó a partir del año 1992 una normativa, conocida como norma Euro [65], que establece los límites máximos permitidos de las emisiones contaminantes de CO, HC, NO_x y partículas liberadas por el tubo de escape de los vehículos nuevos para poder ser matriculados en los Estados Miembros.

Esta normativa ha ido actualizándose hasta la actualidad abordando los siguientes aspectos, siendo la Euro 6 la vigente actualmente [66]:

- **Límites de emisiones:** Se han ido imponiendo reducciones sucesivas del límite máximo de las emisiones permitidas:

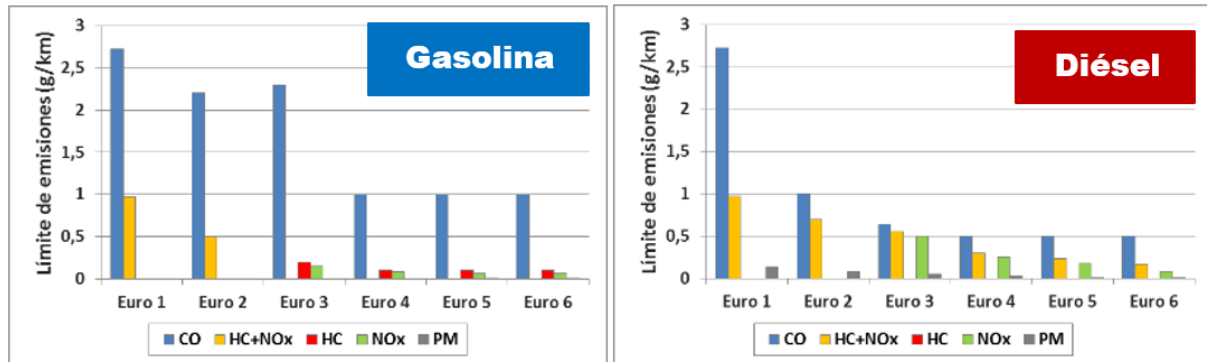


Figura 9. Límites de emisiones contaminantes en gasolina y diésel, según cada norma Euro. Fuente: Dieselnets [67].

- **Ciclos de homologación:** Hasta el año 2017 la homologación de los vehículos en materia de emisiones contaminantes se realizaba bajo el ciclo NEDC (*New European Driving Cycle*) y a partir de esta fecha entraron en vigor dos nuevos ciclos en sustitución del existente. Por un parte, el ciclo WLTC (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle*) que es un ciclo de laboratorio, equivalente al NEDC pero más dinámico, intentando reproducir la conducción habitual de los vehículos en un entorno controlado, con un clima ideal (20-30°C), sin viento, conducción estandarizada y tráfico inexistente [26]. Y, por otra parte, el ensayo RDE (*Real Driving Emissions*), en cambio, se analiza en un mundo real, es decir, se consideran posibles atascos, subidas o bajadas de terreno, viento, acelerones y frenazos, etc. Por tanto, con los ensayos RDE tienden a obtenerse unos resultados ligeramente superiores.
- **Introducción de límites a nuevas emisiones contaminantes no procedentes del proceso de combustión:** La normativa Euro 7 (Reglamento 2024/1257) [35] ha incorporado, por primera vez, requisitos para limitar las emisiones de partículas de desgaste de frenos y neumáticos, de aplicación a todas las tecnologías de propulsión, incluidos los vehículos que no tienen motor de combustión tales como los eléctricos de batería y de pila de combustible con hidrógeno. Inicialmente fue estipulado que entraría en vigor en 2025, aunque finalmente será en 2027 cuando se lance esta medida [68].

La normativa Euro 6, a su vez, se ha ido actualizando mediante distintas subfases [69] que han endurecido los métodos de medición y control de emisiones, desde 2014 hasta 2025: Euro 6a, 6b, 6c, 6d-TEMP, 6d y 6e. Hasta Euro 6b, el ciclo de ensayo aplicable era el NEDC, pasando al WLTC a partir de Euro 6c (2017).

El ensayo RDE, en cambio, comenzó a ser obligatorio con la subfase Euro 6d-TEMP (septiembre de 2019), aunque con un “factor de conformidad” flexible respecto al límite WLTC. En la siguiente tabla, se resumen los factores de conformidad de RDE respecto a WLTC, para las últimas subetapas de Euro 6 y los distintos contaminantes:

Tabla 17. Factores de conformidad del ensayo RDE respecto a WLTC. Fuente: elaboración propia a partir de Dieselnets [69].

Normativa	NOx	PN	CO
Euro 6d-TEMP	2,1	1,5	-
Euro 6d	1,43		-
Euro 6e	1,1	1,34	-

Por otra parte, a nivel de calidad de aire, la Directiva 2024/2881 [70] de la UE establece las concentraciones límites de contaminante para mantener la calidad del aire en las ciudades. A nivel nacional, la Ley 7/2021 de Cambio Climático y Transición Energética [71], establece que los municipios españoles de más de 50.000 habitantes, los territorios insulares y los municipios de más de 20.000 habitantes que superen los valores límite de los contaminantes regulados deberían adoptar, antes de 2023, planes de movilidad urbana sostenible que introduzcan medidas de mitigación que permitan reducir las emisiones derivadas de la movilidad incluyendo, entre otras, el establecimiento de zonas de bajas emisiones. Para ello, algunas de las ciudades que ya lo tienen implementado (no todas lo tienen aún [71]), establecen el acceso a las zonas de bajas emisiones en base a la clasificación medioambiental de los vehículos establecida por la Dirección General de Tráfico [72], en función de la antigüedad y tipología del vehículo.

Este sistema asigna una etiqueta, al menos en teoría, en función de un umbral de emisiones:

-Etiqueta 0 emisiones: aquí entran los BEV, los de autonomía extendida (REEV), los híbridos enchufables (PHEV) con una autonomía mayor a 40 km, y los de pila de combustible (FCEV).

-Etiqueta ECO: tienen derecho a esta etiqueta los PHEV con una autonomía menor a 40 km, los HEV, los microhíbridos (MHEV) y los propulsados por gas natural (GNC, GNL) y gases licuados del petróleo (GLP).

-**Etiqueta C:** entran aquí los ICEV que cumplan con las últimas normativas de emisiones EURO, concretamente los de gasolina matriculados a partir de enero de 2006 y los diésel a partir de septiembre de 2015.

-**Etiqueta B:** por último, en esta categoría entran los ICEV que cumplieran con las primeras normativas EURO. Esto equivale a los de gasolina matriculados a partir de 2001, y los de diésel a partir de 2006.

Como se puede ver, entre las 3 tecnologías sí incluidas en el estudio, los ICEV tienen etiqueta C o B, en función de su antigüedad, los HEV llevan etiqueta ECO, y los BEV, etiqueta 0. Con este sistema actual, por tanto, aunque un ICEV circule siempre con combustible renovable, seguiría teniendo etiqueta C o B y se le impondrían las mismas restricciones que si circula con combustible fósil.

Antecedentes

Como se pudo ver en la *Figura 9*, los vehículos modernos de combustión tienen que cumplir un nivel de emisiones por tubo de escape cada vez menor. En este sentido, estudios como el del ICCT [73], han puesto de manifiesto que las tecnologías de última generación (Euro 6d en adelante) producen emisiones contaminantes en condiciones reales de conducción muy por debajo de los límites establecidos en la regulación, como se muestra en la siguiente gráfica con el ejemplo para NO_x:

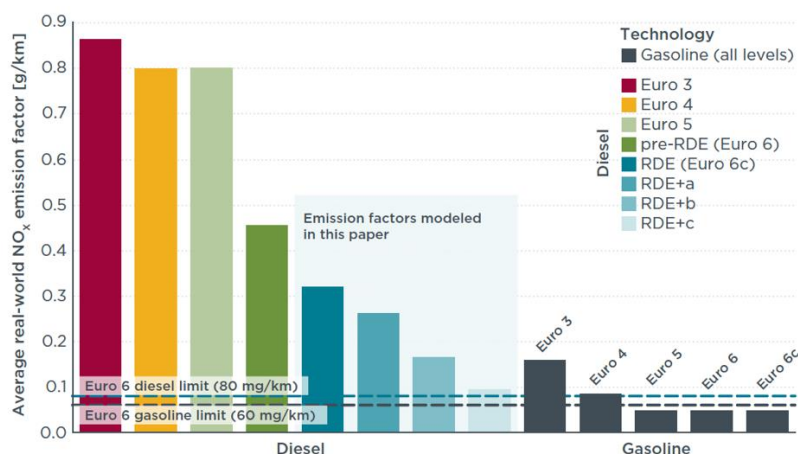


Figura 10. Evolución de las emisiones contaminantes de NO_x en vehículos de gasolina. Fuente: ICCT [73].

Con la introducción en el mercado de los combustibles renovables, también interesa evaluar su efecto sobre estos contaminantes. Hasta ahora, la bibliografía disponible sobre las emisiones en vehículos que utilizan combustibles renovables es muy limitada:



- No hay estudios que comparen las emisiones contaminantes producidos por los vehículos con motor térmico empleando combustibles renovables.
- No hay muchos estudios recientes que analicen las emisiones contaminantes en condiciones reales de conducción incluidas las emisiones de partículas de desgaste (es decir, las debidas a frenos, neumáticos, etc, que no provienen del tubo de escape).

En este trabajo, por tanto, se pretende contribuir con el análisis de datos experimentales obtenidos en diferentes ciclos de conducción empleando combustibles convencionales y renovables. También se analizará la información recabada en bibliografía en relación con las emisiones de partículas de desgaste de diferentes tecnologías de propulsión.

Metodología y criterios aplicados

Para llevar a cabo el estudio comparativo de las emisiones contaminantes de vehículos con motor térmico empleando combustibles convencionales y renovables, así como de vehículos eléctricos de batería, se han abordado dos ámbitos:

- **Emisiones contaminantes producidas en el proceso de combustión.** Para esta parte, se usarán datos de un estudio de colaboración de 2025 entre Seat y Repsol [44] en el que se realizaron ensayos con un diésel 100% renovable (HVO) y una gasolina 100% renovable en dos modelos ICEV: el modelo Seat 326 Ateca diésel (2021), y el Arona MY de gasolina (2024), respectivamente. Como comparación, los ensayos del vehículo diésel se realizaron también con combustible fósil. Ambos vehículos cumplen, por tanto, la norma Euro 6d.

Los análisis se realizaron en 2 tipos distintos de ensayos: el WLTP (es el procedimiento de prueba oficial que utiliza el ciclo WLTC) y el RDE. Dentro de éste último, el estudio analiza un caso estándar y otro en condiciones exigentes (RDE Max), que será el que se use para las gráficas comparativas, además del ensayo WLTP.

Las especies contaminantes que se analizan en el estudio son las siguientes: NO_x, CO, y el número total de partículas (PN). Al ser vehículos Euro 6d, como se comentó anteriormente, es obligatorio que cumplan los límites normativos Euro 6 en WLTC, y en RDE se le aplica un factor de conformidad de 1,43 para el NO_x, y de 1,5 para las PN, como se mostró en la *Tabla 17*. Además de la Euro 6, los resultados también se compararán con los límites de la normativa Euro 7, pese a que ésta entrará en vigor en 2027.

- **Emisiones de partículas de desgaste.** Para este análisis, se va a incluir un análisis de las partículas contaminantes de desgaste, es decir, no procedentes del proceso de combustión y, por tanto, no emitidas por el tubo de escape, y de las cuales, ninguna tecnología de propulsión de vehículos – ya sea motor de combustión o eléctrica - está exenta. Entre estos contaminantes que no son procedentes del tubo de escape, destacan las partículas de frenos, de neumáticos, las “road wear” (por desgaste de pavimento), y las de resuspensión, por levantamiento de polvo y partículas que ya estaban en el suelo. Para las partículas de frenos, neumáticos y road wear, se analizará información de un estudio de la consultora AVL [56], mientras que para las partículas de resuspensión, se analizará información de un estudio de 2021 de la Universidad de Leeds [74]. La tipología de batería es la NMC, al igual que en el resto de secciones del trabajo, y los vehículos son modernos, sujetos a la normativa Euro 6, y en ciclo RDE.

En la siguiente tabla, se muestran los límites de emisiones en vehículos de los contaminantes que se analizarán en este estudio, y que vienen recogidos en Euro 6 y/o Euro 7:

*Tabla 18. Comparativa del límite de emisiones contaminantes para vehículos ligeros entre Euro 6 y Euro 7 [75].
Fuente: elaboración propia.*

Contaminante	Unidad	Euro 6			Euro 7		
		Gasolina	Diésel	BEV	Gasolina	Diésel	BEV
NO _x	mg/km	60	80	-	60	80	-
PN	#/km	6*10 ¹¹	6*10 ¹¹	-	6*10 ¹¹	6*10 ¹¹	-
CO	mg/km	1000	500	-	500	500	-
Frenos	mg/km	-	-	-	7	7	3

Como se puede ver, Euro 6 y 7, de momento, no limitan la cantidad de contaminantes de neumáticos, las ni las road wear, ni las de resuspensión. En cuanto a las partículas por tubo de escape que se analizan en este estudio, el único cambio entre Euro 6 y Euro 7 es que se equiparan las emisiones de CO, de forma que la gasolina y el diésel ahora tienen el mismo límite.

Por tanto, en esta sección se van a analizar comparativamente las siguientes opciones de tecnologías vigentes en el escenario temporal 2025:

Tabla 19. Alternativas escogidas en el análisis de emisiones contaminantes. Fuente: elaboración propia.

Alternativa	Combustible/Electricidad	Ensayos	Contaminantes analizados
ICEV - Diésel	- Diésel fósil - Diésel bio (HVO)	- WLTP - RDE	- NOx - CO - PN - Frenos - Neumáticos - Road wear - Resuspensión
ICEV - Gasolina	- Gasolina fósil - Gasolina bio	- WLTP - RDE	- NOx - CO - PN - Frenos - Neumáticos - Road wear - Resuspensión
BEV	No aplica	- RDE	- Frenos - Neumáticos - Road wear - Resuspensión

Presentación y análisis de resultados

A continuación, se adjuntan varias tablas obtenidas del estudio de Seat y comparativas entre gasolina y diésel para los 3 contaminantes más relevantes (NO_x , PN y CO), incluyendo los valores de las opciones fósiles y bio tanto del ciclo WLTP como del RDE Max, y los límites Euro 6 y Euro 7, indicados en la Tabla 3:

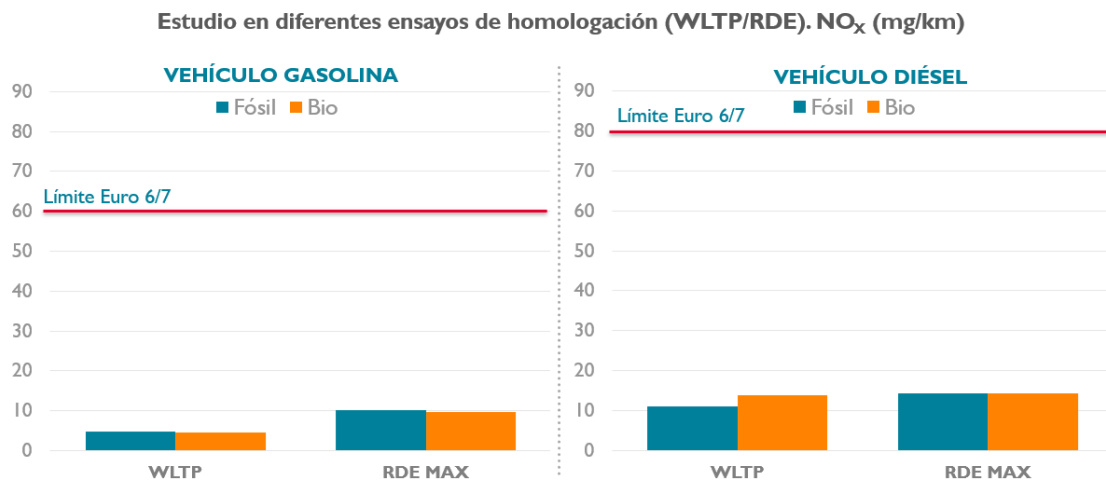


Figura 11. Ensayo comparativo de las emisiones de NO_x . Fuente: elaboración propia a partir del estudio de Seat [44].

Se puede ver que los valores para el vehículo de gasolina salen ligeramente inferiores al del diésel, aunque en todo caso, los resultados se quedan muy lejos de los límites Euro 6 y Euro 7. Se observa que los casos fósil y renovable para cada tipo de vehículo son prácticamente iguales.

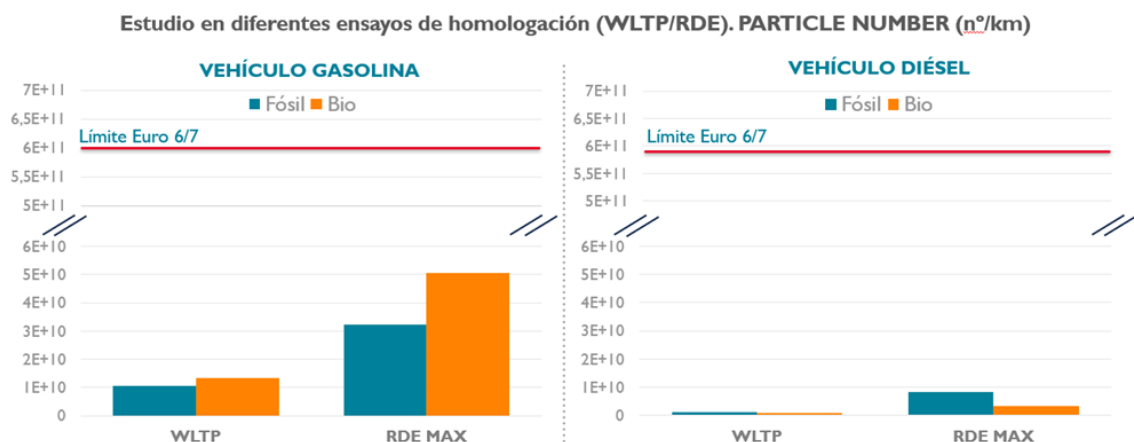


Figura 12. Estudio comparativo de las emisiones de PN. Fuente: elaboración propia a partir del estudio de Seat [44].

En el caso del número de partículas, es el vehículo de gasolina el que tiene unas emisiones mayores, siendo además ligeramente superior el caso con gasolina renovable. Aún así, de nuevo, los valores se quedan muy lejos de sobrepasar el límite Euro 6/7, quedándose un orden de magnitud inferior.

En el caso del vehículo diésel, al contrario que el de gasolina, el ensayo con combustible renovable sale algo inferior, aunque muy similar.

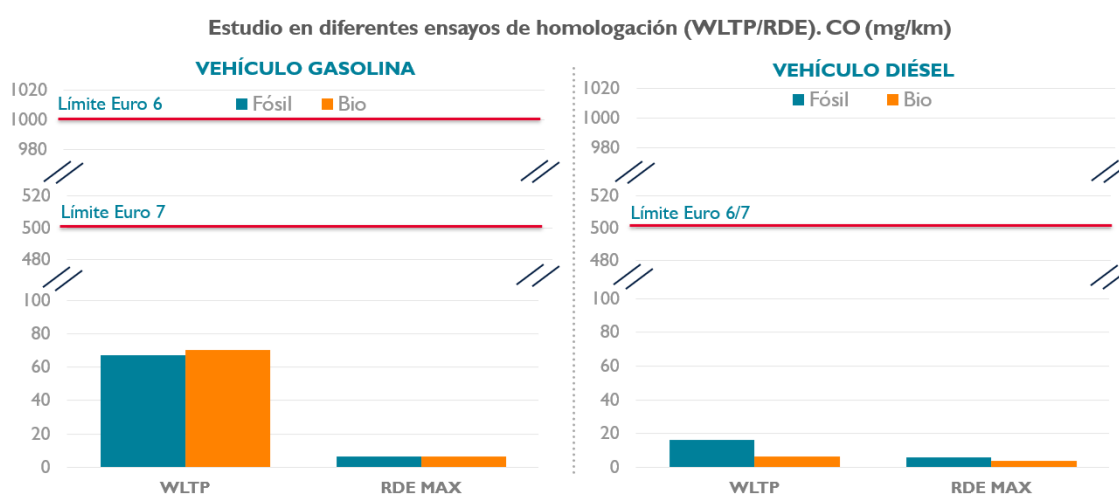


Figura 13. Estudio comparativo de las emisiones de CO. Fuente: elaboración propia a partir del estudio de Seat [44].

Por otro lado, con el monóxido de carbono, las emisiones se vuelven a quedar muy lejos de los límites Euro 6 y 7, sin diferencias reseñables en la gasolina entre los valores fósil y renovable, y ligeramente inferior el caso renovable en el diésel.

Para este contaminante, el ensayo RDE ha arrojado valores inferiores a los del WLTP, lo cual puede parecer sorprendente, dado que el RDE se realiza en condiciones de conducción más reales y dinámicas. Sin embargo, esto puede explicarse porque una parte significativa del ciclo WLTP se lleva a cabo con el motor en frío, cuando el sistema de postratamiento de gases (especialmente el catalizador) aún no ha alcanzado su temperatura óptima de funcionamiento. En estas condiciones, es más probable que se generen mezclas ricas, lo que incrementa las emisiones de CO. En cambio, el RDE, al desarrollarse en carretera y durante un periodo más prolongado, suele mantener el motor y el catalizador a temperaturas estables, favoreciendo una mejor conversión del CO y, por tanto, menores emisiones. Estos resultados también ponen de manifiesto la cada vez mayor eficiencia de los sistemas de control de emisiones de vehículos y su optimización, mostrando cada vez menores diferencias entre los valores de emisiones contaminantes medidos en el ciclo de homologación de laboratorio con el WLTP, y los obtenidos en conducción real con RDE.

Finalmente, se incluye una figura resumen de todos los contaminantes principales, para gasolina y diésel, sin los límites Euro 6 y 7. Se incluyen también los hidrocarburos totales (THC, *Total Hydrocarbons*), que no se han considerado analizar por separado al ser menos relevantes, pero el estudio de Seat los reporta. El límite Euro 6 y 7 para este contaminante también está bastante lejos del resultado del estudio de Seat (100 mg/km).

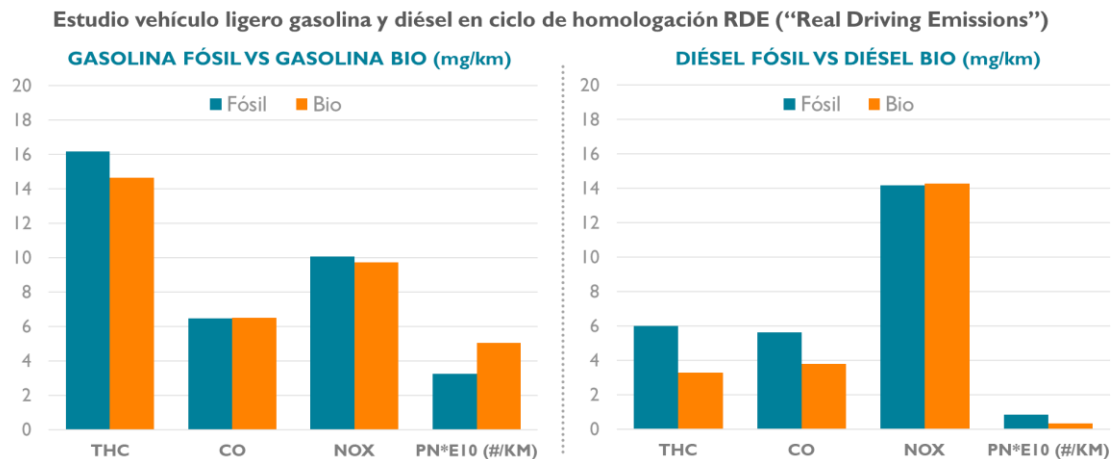


Figura 14. Ensayo comparativo de los principales contaminantes. Fuente: elaboración propia a partir del estudio de Seat [44].

En conclusión, se puede observar que el vehículo de gasolina de este estudio tiene unas emisiones en conjunto ligeramente superiores al diésel, aunque en todo caso muy por debajo a los límites Euro 6, y también de los de Euro 7, que aún no se han implantado. Es decir, los vehículos ICEV modernos ya tienen un nivel de emisiones de contaminantes locales muy bajo. Además, el empleo de combustible renovable no empeora estos datos, incluso mejorándolos en algunos casos.

A medida que los sistemas de control de emisiones de combustión se vuelven más eficientes y las emisiones procedentes del tubo de escape disminuyen progresivamente, las emisiones de partículas de desgaste están tomando mayor relevancia por su contribución a la emisión total de partículas a la atmósfera. Según los datos del Sistema Español de Inventario de Emisiones [76], en las siguientes gráficas se pueden observar estas tendencias, para las partículas PM_{2,5} y PM₁₀:

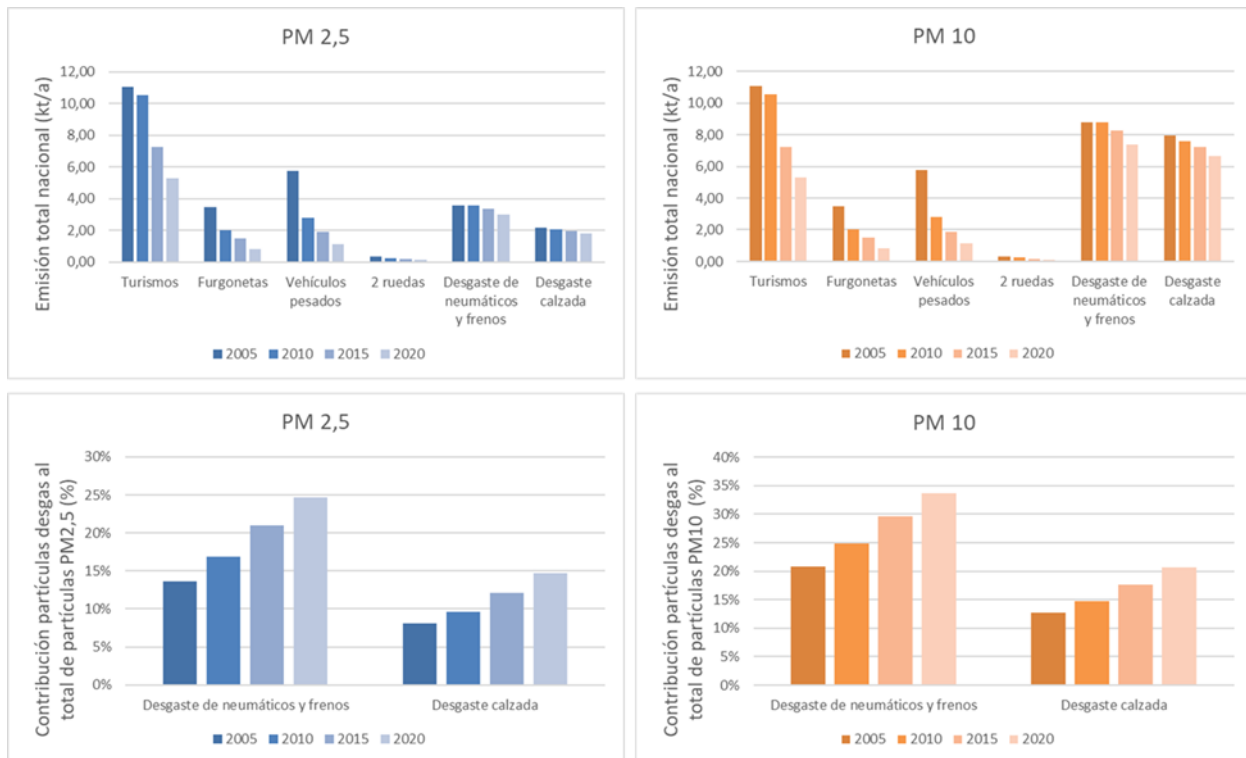


Figura 15. Tendencias en la emisión de partículas de desgaste PM2,5 y PM10 en los últimos años. Fuente: elaboración propia a partir del Sistema Español de Inventario de Emisiones [76].

Para cerrar este capítulo, se muestran los resultados del estudio de partículas de desgaste, que son los siguientes:

Tabla 20. Comparativa de emisiones no procedentes del tubo de escape. Fuente: elaboración propia a partir de AVL [56] y la Universidad de Leeds [74].

	ICEV				BEV	Fuente
	Gasolina fósil	Gasolina bio	Diésel fósil	Diésel bio		
Frenos (mg/km)	11	11	11	11	3,5	AVL
Neumáticos (mg/km)	10,15	10,15	10,15	10,15	11,6	AVL
Road wear (mg/km)	13,5	13,5	13,5	13,5	16,5	AVL
Resuspensión (mg/km)	11	11	11	11	12,5	Liu et. al
Total (mg/km)	45,65	45,65	45,65	45,65	44,1	-



Se puede observar que las emisiones de frenos son menores en los vehículos eléctricos, debido al empleo del frenado regenerativo que no tienen los vehículos de combustión. En cambio, en los otros tres parámetros, el vehículo eléctrico muestra unos resultados ligeramente superiores, debido al mayor peso del vehículo, por lo que aporta la batería. Como es de esperar, no hay diferencia en los resultados en función de si el coche de combustión es de diésel o gasolina, o si lleva combustible renovable o no. Las emisiones de los HEV, que AVL también analiza, se quedarían en un término medio entre las de los ICEV, y los BEV. En conjunto, considerando los 4 tipos de partículas estudiadas, los resultados son muy parejos entre el ICEV y el BEV, y previsiblemente lo serían también en el HEV, de disponer de su información completa.

En cuanto a las emisiones en frenos, la normativa Euro 7 incluye también un límite para este tipo de partículas, como novedad respecto a Euro 6. También hay interés en limitar las partículas de desgaste de neumáticos [77], pero no hay límites aún establecidos. En cuanto a los frenos, Euro 7 indica un límite de 7 mg/km para vehículos de combustión interna, y 3 mg/km para los BEV, como se mostró en la *Tabla 18*. Según los datos de AVL, no se estarían cumpliendo los límites de Euro 7, en especial en los ICEV, por lo que en este parámetro se necesita un avance tecnológico en los sistemas de frenos de los vehículos [56].

Conclusiones

Tras lo expuesto en esta sección, se evidencia que los vehículos de combustión interna de última generación (Euro 6d) producen unas emisiones contaminantes muy por debajo de los límites establecidos, incluso en condiciones reales de conducción y en algunos casos respecto a los límites Euro 7, aún no implementados. Por otro lado, el empleo de combustibles renovables en estos vehículos presenta unos resultados equivalentes a los obtenidos con combustible convencional.

Además, debido a la alta eficiencia de los sistemas de control de emisiones de partículas de combustión (filtros de partículas), estas emisiones de tubo de escape son cada vez menores, adquiriendo una importancia creciente las partículas de desgaste en la contribución total de partículas a la atmósfera.

Por lo tanto, aunque las emisiones contaminantes de los vehículos de combustión ICEV liberadas por el tubo de escape resultan significativamente superiores, los BEV también presentan aportaciones relevantes, pese a no emitir por el tubo de escape. Esto evidencia la necesidad de que la normativa contemple de manera integral todas las fuentes de emisiones, no solo las asociadas al tubo de escape o a los frenos, para reducir los riesgos potenciales sobre la salud que podrían estar infravalorados. Asimismo, esto pone de manifiesto que, si bien los BEV suelen clasificarse como vehículos de “cero emisiones”, en realidad sí generan emisiones directas que no deben pasarse por alto.



Consumo de agua

Contexto

El consumo de agua asociado al sector del transporte constituye un aspecto ambiental de creciente relevancia, especialmente en el contexto de la transición hacia tecnologías más sostenibles, siendo uno de los pilares de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), cada vez más aplicada por ser una herramienta idónea para analizar de forma objetiva, sistemática y científica, el impacto ambiental durante todo el ciclo de vida de un proyecto, servicio o producto [78].

Analizar el consumo de agua adquiere aún mayor importancia si se considera que, según datos de UNICEF [79], aproximadamente 4.000 millones de personas (cerca de dos tercios de la población mundial) experimentan una severa escasez de agua de al menos un mes al año. Además, se estima que para 2050, más de 5.000 millones de personas podrían enfrentarse a limitaciones significativas de agua a lo largo del año, según WMO [80]. En este contexto, garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua, así como el saneamiento para todos, constituye el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6 (Agua Limpia y Saneamiento), definido por las Naciones Unidas.

Por lo tanto, se puede observar que, aunque tradicionalmente las evaluaciones ambientales de los vehículos se han centrado en las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso de recursos hídricos a lo largo del ciclo de vida también puede representar un impacto significativo que no debe pasarse por alto.

Antecedentes

A la hora de analizar el consumo de agua en el ciclo de vida de un vehículo, una consideración típica es indicar el concepto de **consumo de agua azul**. Ésto se refiere al agua extraída de fuentes superficiales o subterráneas y que no se devuelve al mismo sistema de drenaje [42]. El inventario de agua azul incluye el agua dulce, pero excluye el agua de lluvia. Este consumo puede ser por evaporación, transpiración, por agua que se integra en productos o por agua que se libera en otro sistema de drenaje o en el mar. Conviene no confundirlo con uso de agua, que es un término más amplio y que incluye agua que sí puede regresar a la cuenca después de ser utilizada.



En el contexto del ciclo de vida total de los vehículos, es muy relevante el consumo de agua en la producción hidroeléctrica de cara a evaluar el impacto ambiental total de cada tipo de vehículo. Los vehículos eléctricos y los de combustión con e-fuels dependen en gran medida de la electricidad, y la producción de esta electricidad, si viene de fuentes como la hidroeléctrica, puede involucrar un reseñable consumo de agua, en especial el consumo de agua debido a la evaporación de los embalses. Aunque este consumo introduce una considerable incertidumbre en los estudios de evaluación ambiental, ya que su magnitud y repercusiones pueden variar según las condiciones locales y los métodos de estimación utilizados [42].

En cuanto a los estudios bibliográficos que analicen el consumo de agua en el ciclo de vida de un vehículo, no se ha encontrado ninguno que analice combustibles renovables puros. Los análisis más próximos se centran en el consumo de agua en un ICEV con gasolina E-10, es decir, con un 10% de etanol. Para vehículos eléctricos, sí que hay estudios que comparan el consumo en diferentes países. No obstante, las diferencias en la definición de consumo de agua y la consideración de la energía hidroeléctrica dificultan la comparación entre estudios, en parte porque no se sigue una metodología estandarizada que unifique los criterios de análisis.

Metodología y criterios aplicados

Dado que en bibliografía no hay estudios que analicen el consumo de agua en vehículos con combustible 100% renovable, para esta parte del análisis se cogerá información de un estudio preparado para Repsol por la consultora Sphera Solutions [42]. En este informe se realiza una estimación del consumo de agua azul en todo el ciclo de vida para turismos del Segmento C en el año 2025, utilizando distintas combinaciones de tecnologías de propulsión y fuentes de energía.

A partir de este estudio se plantean las alternativas recogidas en la *Tabla 21*, donde se incluyen vehículos ICEV diésel, HEV gasolina y BEV, junto con diferentes escenarios de combustible o electricidad y la consideración de dos horizontes temporales: 2025 y 2035:

Tabla 21. Alternativas de descarbonización escogidas en el análisis de consumo de agua en ciclo de vida. Fuente: elaboración propia.

	Combustible / Electricidad	Fabricación Batería	Escenario temporal
ICEV – Diesel	- Combustible convencional - Biocombustible HVO (a partir de UCO). - RFNBO (e-diesel)	-	2025
HEV – Gasolina	- Combustible convencional - Biocombustible (producido a partir de etanol) - RFNBO (e-gasolina)	China	2025, 2035
BEV	Mix eléctrico UE	China	2025, 2035
		UE	2025, 2035
	Mix eléctrico España	China	2025, 2035
	Mix eléctrico 100% renovable (energía eólica)	China	2025, 2035

Para el escenario 2035, y al igual que en la sección de emisiones de GEI, el análisis se centra únicamente en la comparación entre el HEV de gasolina y el BEV. En este caso no se incorpora el posible cambio en la composición de las redes eléctricas nacionales debido a la falta de información en el informe original de Sphera. No obstante, se ajustan los consumos energéticos y los tamaños de batería según los valores utilizados en la sección de emisiones de GEI, recalculando el consumo de agua a partir de los datos disponibles para 2025:

Tabla 22. Tamaños de batería y consumos energéticos de los vehículos del estudio de consumo de agua. Fuente: elaboración propia.

Alternativa	Tamaño de batería				Consumo energético			
	2025		2035		2025		2035	
	Tamaño [kWh]	Fuente	Tamaño [kWh]	Fuente	Consumo [L/100km ó kWh/100km]	Fuente	Consumo [L/100km ó kWh/100km]	Fuente
ICEV-Diésel	-	-	-	-	4,98	IDAE [33]	-	-
HEV-Gasolina	1,5	FEV [34]	2	FEV [34]	5,55	IDAE [33]	3,8	FEV [34]
BEV	63	IDAE [28]	100	FEV [34]	15,1	FEV [34]	12,3	FEV [34]

En el estudio de Sphera se analizan vehículos ICEV tanto de gasolina como de diésel; sin embargo, los resultados del primero se han adaptado para representar un HEV con batería de 1,5 kWh, con el fin de mantener la coherencia en todo el trabajo. De forma análoga, dado que Sphera considera una batería de 60 kWh para el BEV [42], los resultados se han recalculado para el tamaño de 63 kWh empleado en otras secciones.

La unidad funcional a la que se refiere el estudio es la de 1 vehículo conducido durante su kilometraje de vida útil (200.000 km), igual que en la sección de emisiones GEI, y el enfoque es “cradle-to-grave”, es decir, de la cuna a la tumba, teniéndose en cuenta por tanto todo el ciclo de vida del vehículo. La batería supuesta también es una NMC.

En el estudio, se analiza el consumo de agua azul, explicado previamente. En cuanto al consumo en la producción de energía hidroeléctrica, dado que presenta ciertas incertidumbres tanto por la variabilidad de métodos de cálculo como por las características específicas de cada proyecto hidroeléctrico, Sphera [42] evalúa el impacto del consumo de agua con y sin la contribución hidroeléctrica. De este modo, ofrece una estimación que considera todas las contribuciones, incluida la hidroeléctrica a pesar de su alta incertidumbre actual y otra más conservadora, sin incluirla. En este trabajo se adoptará la opción conservadora.

Por tanto, el estudio de Sphera del que se saca información para este trabajo es un informe pionero en este aspecto, destacando la dificultad de comparación con otros informes y por ello una mayor incertidumbre en los resultados. No obstante, su relevancia es fundamental para poder analizar equitativamente distintas opciones de movilidad desde una perspectiva de ciclo de vida, siendo el consumo de agua, como se comentó en la parte de contexto, uno de los parámetros más críticos y en los que las administraciones están prestando cada vez más atención.

Presentación y análisis de resultados

Los resultados del estudio del consumo de agua azul son los siguientes, empezando por el caso de 2025:

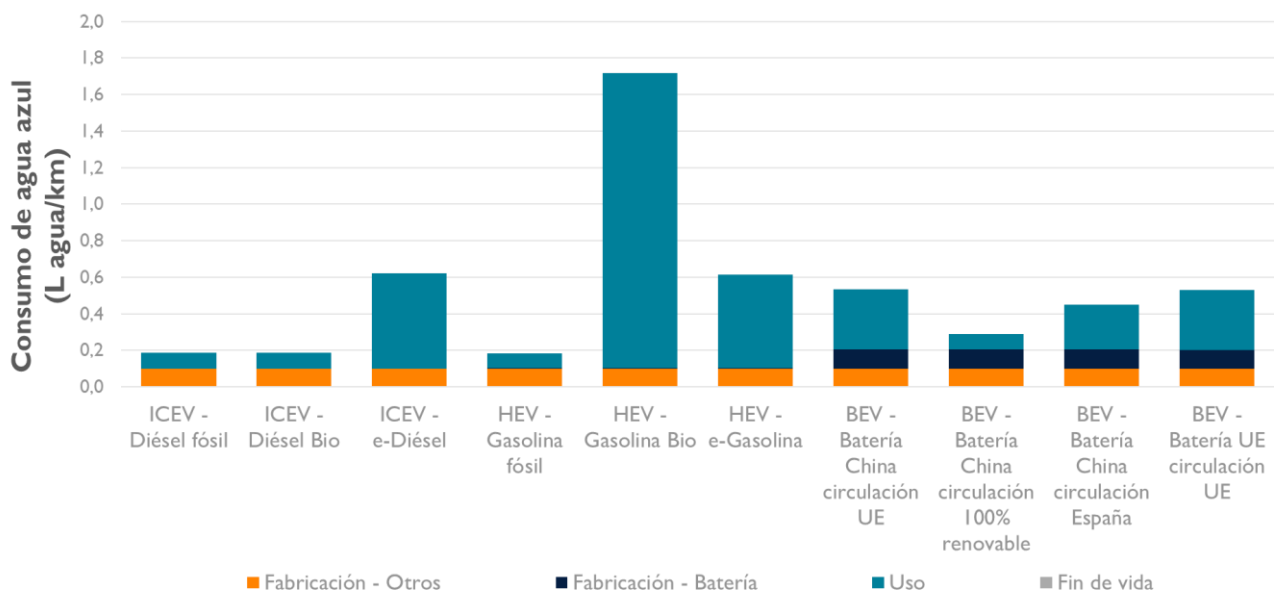


Figura 16. Consumo de agua azul para vehículo ligero en 2025 (L/km). Fuente: elaboración propia a partir del estudio de Sphera [42].

Como se puede observar, la opción 100% fósil es la que lleva un menor consumo de agua azul, tanto para vehículos de gasolina como diésel. En cuanto a alternativas renovables, por lo general, la opción del vehículo térmico diésel con combustible renovable bio es la opción que muestra mejores resultados, quedando en un término medio las opciones de vehículo eléctrico, y en último lugar las opciones con combustible sintético, y la de gasolina bio. Estos resultados evidencian que la descarbonización del transporte por carretera implica, en la mayoría de los casos, un incremento en el consumo de agua.



La fase de uso del vehículo es la que conlleva un mayor consumo en la mayoría de casos, en especial derivado por la producción de la energía que se suministra al vehículo. Para la parte de manufactura, lo que más contribuye es la parte de ensamblaje, los motores y las carrocerías. Por otro lado, la batería tiene también un papel reseñable. Como se observa en las figuras, la fabricación del vehículo eléctrico con su batería tiene mayor consumo de agua que incluso todo el ciclo de vida de un ICEV con diésel fósil o bio.

En cuanto a las opciones de combustible renovable, la del diésel bio (HVO) es la que menor consumo de agua tiene, mientras que la gasolina bio (producida por la ruta Etanol a Gasolina, EtG) es la de mayor consumo. El alto resultado en esta ruta se debe principalmente a la producción de la celulosa para obtener el etanol, no al proceso final de convertir ese etanol en gasolina. La alternativa del combustible sintético, por otro lado, tiene también un consumo de agua reseñable, sobre todo por la producción de hidrógeno.

Respecto a las opciones del vehículo eléctrico, la recarga del coche con electricidad 100% eólica es la opción que menos agua consume de todos los BEV. Esto es debido a que la energía eólica es una de las tecnologías de generación eléctrica que menos agua consume.

Por último, la reducción en el consumo moviendo el proceso de producción de la batería de China a Europa es despreciable, siendo menor al 4%, según Sphera [42]. Esto no sigue el mismo patrón que lo que se observó para la parte de emisiones de GEI, donde sí que había un claro beneficio al desplazar a Europa esta parte del proceso.

Cabe destacar que, al adoptarse una estimación conservadora que excluye la contribución de la energía hidroeléctrica, se subestima un consumo significativo de agua, lo que podría modificar los resultados. Esto afectaría principalmente al consumo en la fabricación de la batería, que se realiza en China, país cuyo mix eléctrico incluye aproximadamente un 15% de electricidad hidroeléctrica. De manera similar en la etapa de uso de los BEV que se recargan con electricidad de la red española o de la UE, donde la contribución hidroeléctrica también oscila en el 15% [38]. Por último, resulta también relevante en la etapa de producción de los e-fuels para los vehículos de combustión, ya que la generación del hidrógeno necesario para estos combustibles también depende de electricidad de la red.

Por último, se muestran los resultados para el caso a 2035, modificando sólo los consumos y tamaño de batería. Esto hace variar el consumo de agua en la fase de fabricación de la batería, y en la fase de uso. Cabe señalar que los resultados podrían variar ligeramente si se tuviera en cuenta la evolución de las redes eléctricas hacia 2035, ya que estas podrían modificar el consumo de agua asociado a la producción de energía respecto a 2025. Sin embargo, dado que no se dispone de dicha información, se ha asumido un consumo equivalente al de 2025 en este aspecto.

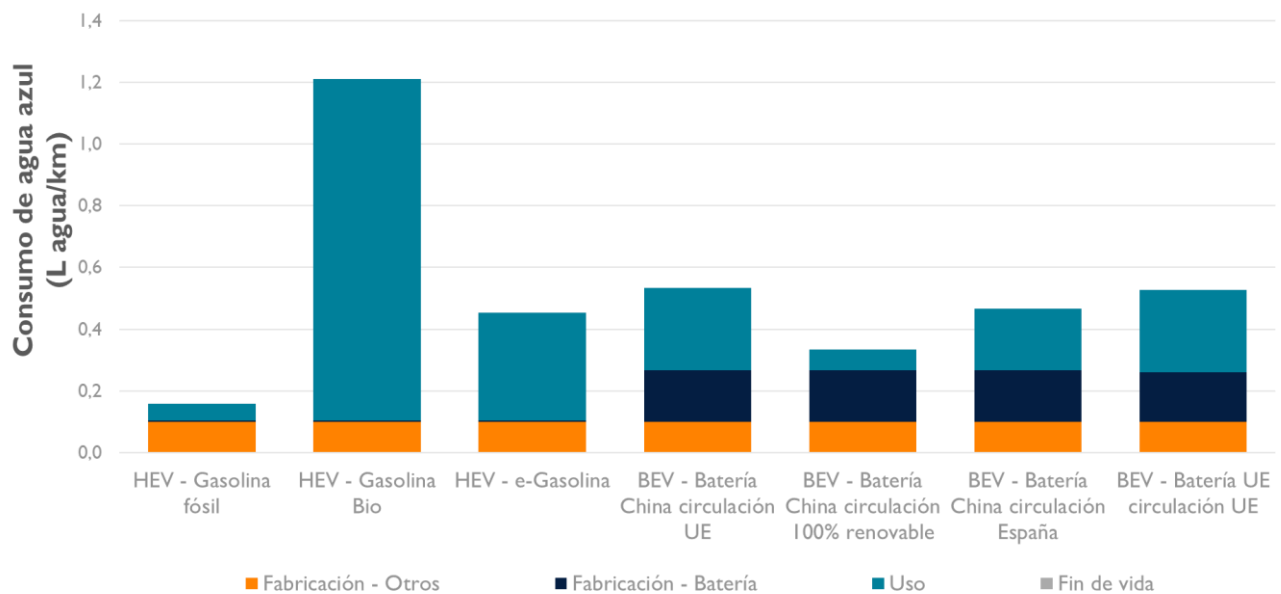


Figura 17. Consumo de agua azul para vehículo ligero en 2035 (L/km). Fuente: elaboración propia a partir del estudio de Sphera [42].

En cuanto a los BEV, los resultados son muy similares a los de 2025: el mayor consumo de agua en la fabricación de la batería, debido a su mayor tamaño, queda compensado por la reducción en la fase de uso asociada al menor consumo de combustible. En este sentido, la que queda más penalizada de todas las opciones es la de circulación 100% renovable, cuyo peso en la fabricación de la batería es mayor al de la fase de uso.

En el caso de los HEV, sí se observa una reducción del consumo de agua frente a 2025. Dado que su batería es más pequeña que la de un BEV, el incremento de tamaño respecto a 2025 no supone un aumento significativo en la fase de fabricación. En cambio, la disminución en la fase de uso sí resulta relevante, gracias al menor consumo de combustible.

Tabla 23. Comparativa del consumo de agua en ciclo de vida entre 2025 y 2035 (L/km).

Alternativa	2025	2035
ICEV - Diésel fósil	0,19	-
ICEV - Diésel bio	0,19	-
ICEV – e-Diésel	0,62	-
HEV - Gasolina fósil	0,18	0,16
HEV - Gasolina bio	1,72	1,21
HEV – e-Gasolina	0,61	0,45
BEV - Batería China circulación UE	0,53	0,53
BEV - Batería China circulación 100% renovable	0,29	0,33
BEV - Batería China circulación España	0,45	0,47
BEV - Batería UE circulación UE	0,53	0,53

Por tanto, al igual que pasaba en la sección de emisiones de GEI, se vuelve a poner de manifiesto que el aumento del tamaño de las baterías a futuro puede resultar contraproducente en la comparativa de emisiones y consumo de agua respecto a los vehículos de combustión, si no se aplican tecnologías de reducción de este consumo.

Estudio bibliográfico agua

Como se comentó previamente, no se han encontrado estudios bibliográficos donde se analicen vehículos de combustión con combustible 100% renovable. Además, hay una alta incertidumbre debida a la consideración que hace cada informe sobre el consumo de agua, y en función de si dividen ese consumo entre las distintas etapas del ciclo de vida. Todos los artículos encontrados en bibliografía analizan ICEVs de gasolina en vez de HEVs, por lo que en este caso se utilizan los datos originales de Sphera para ICEV. En estos estudios, los casos más cercanos al 100% renovable son mezclas con hasta un 10% de etanol.

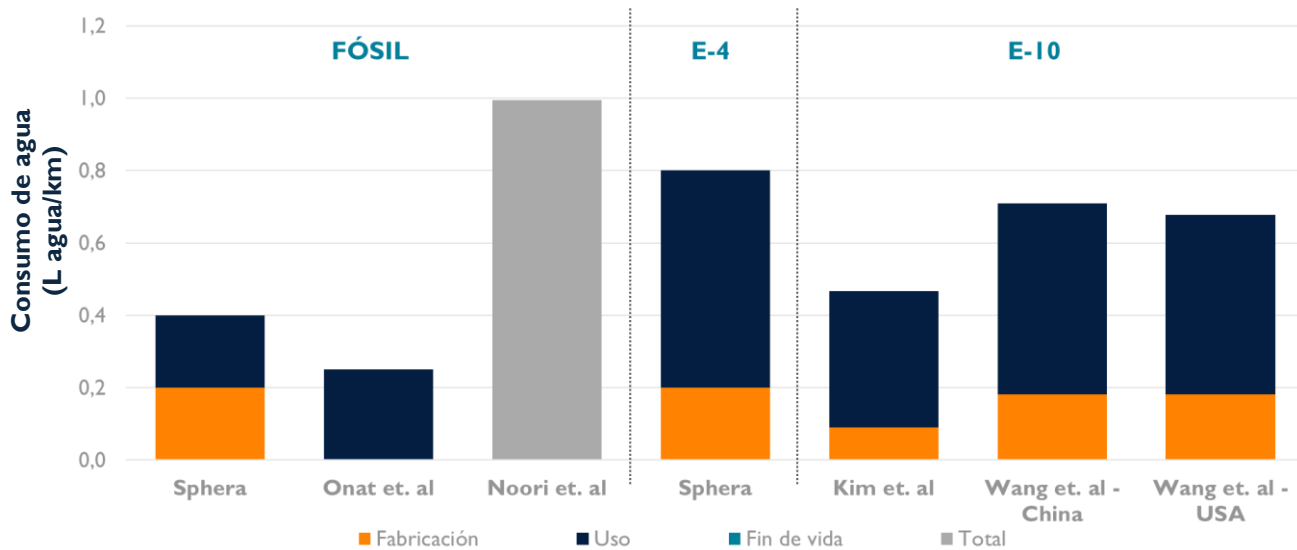


Figura 18. Consumo de agua en ICEVs de gasolina. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [42] y varias fuentes adicionales.

Aunque los resultados son algo dispares, se puede observar una ligera tendencia a un aumento de consumo a medida que el porcentaje de combustible renovable es mayor. Como se puede ver en el estudio de Wang et. al [81], hay ligeras diferencias entre un vehículo circulando en China y otro en Estados Unidos, lo que demuestra que la eficiencia del vehículo o el origen del combustible también puede variar entre un país y otro para los de combustión.

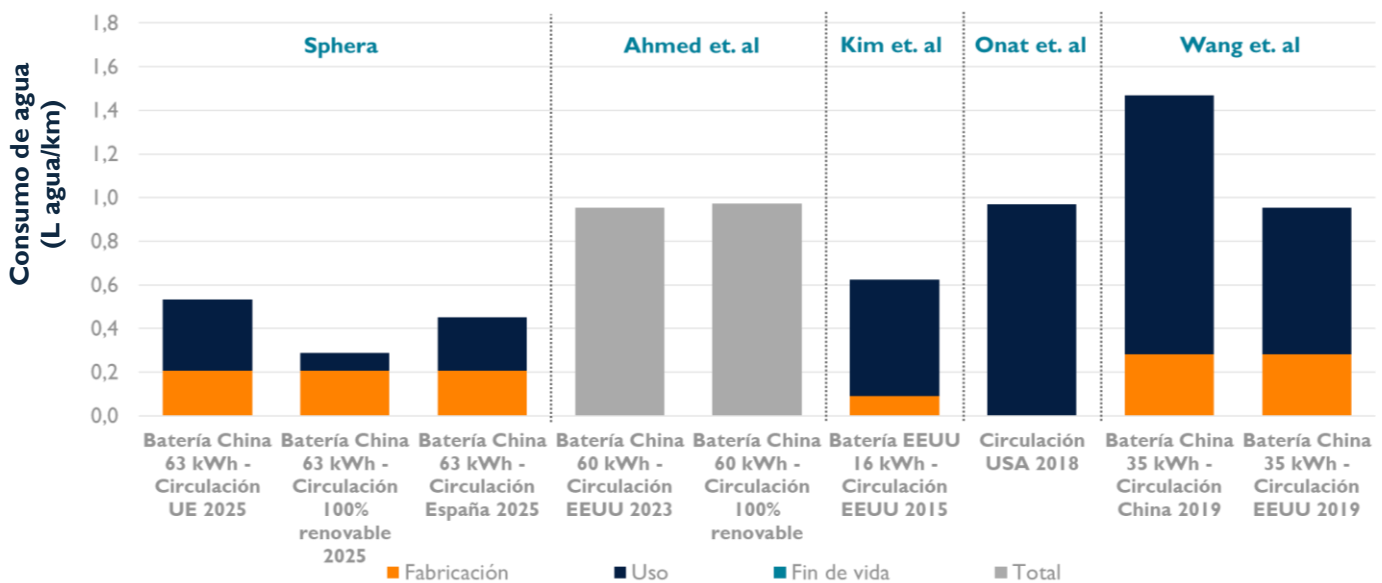


Figura 19. Consumo de agua en BEVs en diferentes fuentes y ejemplos. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [42] y varias fuentes adicionales.

Por otro lado, la información en bibliografía relativa a vehículo eléctrico tampoco es homogénea, y no en todos los informes se especifica el tamaño de la batería o la localización de su fabricación. Quizá lo más sorprendente sea el estudio de Wang et. al [81], que con un tamaño de batería menor (35 kWh) al que se adapta de Sphera (63 kWh), su consumo de agua en la etapa de fabricación sale mayor. Esto refleja que, al haber pocos estudios sobre el tema, los resultados pueden variar mucho dependiendo de los criterios que use cada investigación, y que todavía existe bastante incertidumbre y margen de error en estas comparaciones.

Otro punto interesante a comentar es el estudio de Ahmed et. al [82], cuyo consumo de agua en un supuesto de circulación con electricidad 100% renovable sale mayor al supuesto con electricidad de la red de Estados Unidos de 2023. Esto refuerza la idea de que la composición del mix eléctrico, según la participación de fuentes con mayor o menor huella hídrica, puede generar resultados muy distintos dependiendo del país o de la fuente considerada. Esto se observa también en el estudio de Wang et. al, donde el consumo en un escenario de circulación chino sale bastante mayor al caso americano. Esto se explica porque China aún depende en gran medida del carbón y de la hidroeléctrica, ambas con una huella hídrica alta.

Conclusiones

Tras lo presentado en esta sección, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La descarbonización del transporte no siempre implica una reducción del consumo de agua, ya que los combustibles y energías de origen renovable tienden a requerir mayores consumos de agua azul a lo largo del ciclo de vida, sobre todo en la fabricación de las baterías de los vehículos eléctricos, en la producción de hidrógeno o en la producción de etanol.
- En la métrica del consumo de agua, los vehículos de combustión con combustible renovable, en global, presentan unos resultados parejos a los de los vehículos eléctricos, aunque la variabilidad en el resultado es alta y depende de la fuente de energía de cada combustible, mientras que los BEV, en este caso, no muestran tanta variabilidad en función del país de fabricación de la batería o de circulación del vehículo, como sí sucedió en la sección de emisiones de GEI.

- Los resultados también evidencian que, en este caso, al igual que en la sección de emisiones de GEI, incrementar la capacidad de las baterías de los BEV en los escenarios futuros puede resultar contraproducente desde el punto de vista del consumo de agua si no se desarrollan e implementan tecnologías de reducción de este consumo en los procesos, aunque esto se compensa parcialmente por la mejora en el consumo de energía.
- La variabilidad metodológica entre estudios y la falta de consenso sobre la inclusión del consumo asociado a la energía hidroeléctrica introducen una elevada incertidumbre en los resultados comparativos, lo que subraya la necesidad de establecer criterios estandarizados para la evaluación hídrica en el ACV de vehículos.

Total Cost of Ownership (TCO)

Contexto

En el debate público cotidiano sobre el coste de los vehículos, la atención suele centrarse casi exclusivamente en el precio de adquisición y, en segundo lugar, en el precio de la energía necesaria para su funcionamiento. Muchas veces los análisis suelen quedarse ahí, sin considerar otros gastos relevantes que se producen a lo largo de la vida del vehículo o a las diferentes partidas que configuran el precio final (costes e impuestos regulados). Esta visión parcial puede conducir a conclusiones incompletas o sesgadas cuando se comparan diferentes tecnologías de descarbonización del transporte por carretera.

Para realizar una evaluación económica más rigurosa y objetiva, resulta imprescindible recurrir al TCO (*Total Cost of Ownership*, Coste Total de Propiedad). Este indicador permite estimar el coste global de un vehículo a lo largo de su ciclo de vida, no solo incluyendo la adquisición y el consumo energético, sino también los costes de operación, mantenimiento e impuestos.

Además, el TCO no depende sólo de factores técnicos o del propio mercado, sino también de las políticas públicas que están en vigor. Elementos como los impuestos, las ayudas a la compra o los incentivos fiscales pueden cambiar de forma importante el coste real de cada tecnología y, por tanto, su atractivo para los usuarios. En este sentido, entender cómo estas medidas influyen en el coste total es clave para poder comparar de manera justa las distintas opciones y valorar qué soluciones son realmente más sostenibles y viables a largo plazo.

Antecedentes

En bibliografía, probablemente debido a la aún reciente expansión de los combustibles renovables, no se ha encontrado ningún estudio comparativo que analice el TCO de vehículos eléctricos frente a vehículos de combustión con combustible 100% renovable, al centrarse muchos de los estudios económicos en vehículos eléctricos frente a vehículos de combustión, pero sin considerar el combustible renovable y en muchos casos sin considerar el coste a lo largo de la vida útil del vehículo, quedándose en el precio de venta y en el precio de la energía necesaria para su funcionamiento.

En esta línea, un informe interesante reciente de McKinsey & Company [83] revela que sólo un tercio de los encuestados estarían dispuestos a pagar un precio extra de compra por un BEV respecto a un ICEV, con mayor disposición de los encuestados en China. Por otro lado, un número similar de encuestados preferiría que el BEV tuviera un precio inferior al del ICEV para considerarlo como opción de compra:

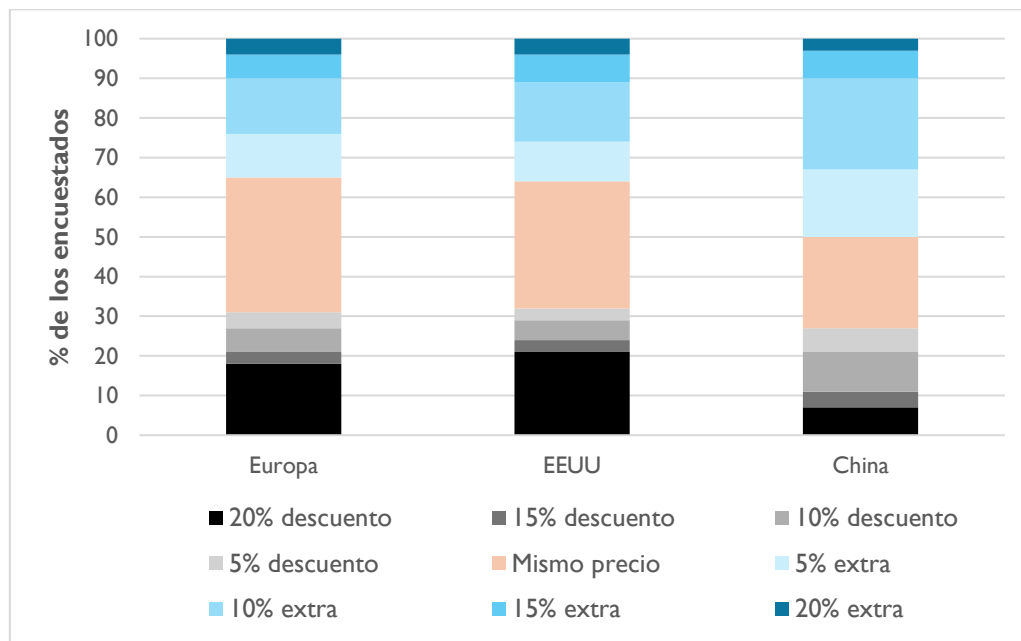


Figura 20. Disposición a pagar un precio adicional por un BEV frente a un ICEV comparable. Fuente: elaboración propia a partir de McKinsey & Company [83].

Por otro lado, otros informes como el del ICCT [41] comparan el coste energético medio por cada 100km, aunque considerando combustible fósil y no renovable. Este es algo inferior para el vehículo eléctrico (7,43€), que para el diésel (8,6€), y la gasolina (11,2€). Son datos en la UE para un turismo de segmento medio en 2025, y teniendo en cuenta que el usuario carga un 80% en su casa y un 20% fuera.

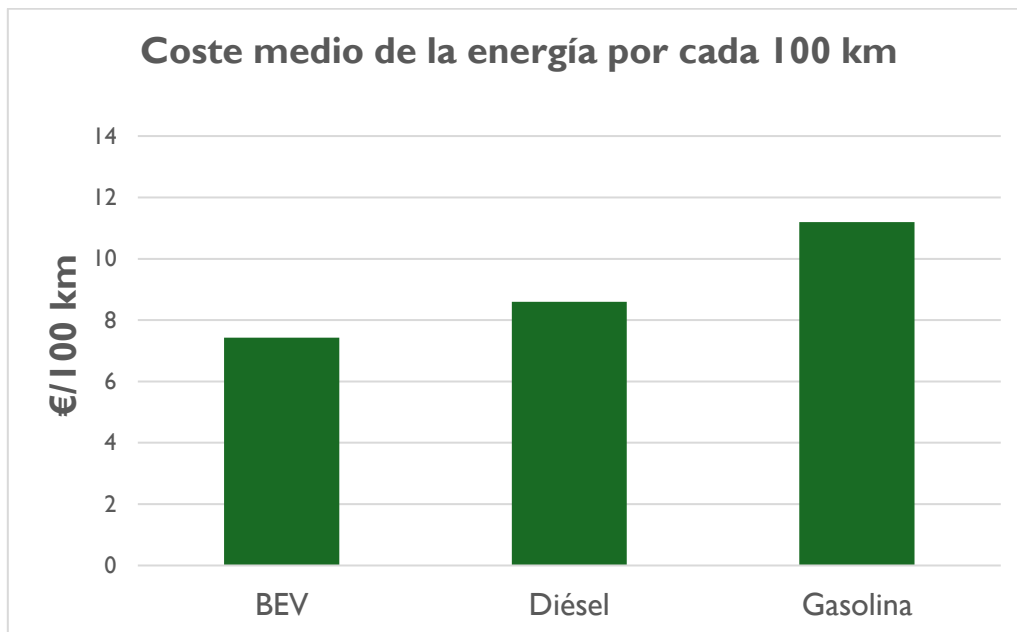


Figura 21. Precio medio de la energía por cada 100km. Fuente: elaboración propia a partir del ICCT [84].

En definitiva, estos informes confirman que, en la mayoría de los casos, el análisis se centra únicamente en el precio de compra y el coste de la energía, sin considerar otros costes a lo largo de la vida útil del vehículo. Esta situación crea, en general, una barrera inicial para que los consumidores se decanten por un coche eléctrico, dado que el precio de compra sigue siendo el factor más relevante, mientras que el menor coste de la energía tiene menor influencia.

Metodología y criterios aplicados

Dada la falta de estudios externos que analicen la vida útil del vehículo desde la perspectiva del TCO, para esta sección se usará información de un informe preparado para Repsol por parte de la consultora FEV [34]. En este estudio, se realiza una comparativa entre un vehículo eléctrico frente a un vehículo HEV con gasolina 100% renovable. Se analizará también un caso a 2035 para estimar la diferencia económica en el tiempo.

Las suposiciones de consumos energéticos y tamaños de batería son los mismos supuestos en el resto del trabajo:

Tabla 24. Tamaños de batería y consumos energéticos de los vehículos del estudio de TCO. Fuente: elaboración propia.

Alternativa	Tamaño de batería				Consumo energético			
	2025		2035		2025		2035	
	Tamaño [kWh]	Fuente	Tamaño [kWh]	Fuente	Consumo [L/100km ó kWh/100km]	Fuente	Consumo [L/100km ó kWh/100km]	Fuente
HEV-Gasolina	1,5	FEV [34]	2	FEV [34]	5,55	IDAE [33]	3,8	FEV [34]
BEV	63	IDAE [28]	100	FEV [34]	15,1	FEV [34]	12,3	FEV [34]

El estudio incluye el coste de las siguientes consideraciones, suponiendo que la batería se fabrica en China y el vehículo circula en España, por la mayor disponibilidad de datos públicos:

- Coste del vehículo sin propulsión.
- Coste de la propulsión.
- Coste de la batería.
- Costes indirectos + margen vehículo.
- Coste del punto de recarga.
- Coste de la energía.
- Coste de mantenimiento.
- Coste del seguro.
- Impuestos del vehículo
- Impuestos en energía.
- IVA.
- Interese de la financiación a la adquisición del vehículo.
- Subvención en la adquisición del vehículo.
- Posible subvención por combustible renovable.

Tanto para 2025 como 2035, se supone una vida útil del coche de 16 años y un kilometraje anual de 12.500 km, para un total de 200.000 km recorridos en vida útil, misma consideración que se realizó en el apartado de emisiones de GEI en ciclo de vida.

Teniendo en cuenta el consumo de gasolina y los km anuales, para 2025 se consumen 694 L de gasolina al año, mientras que, en 2035, 475 L/año. Por otro lado, para el vehículo eléctrico se toma como hipótesis que el 84% de la energía se recarga en el hogar, y el 16% en carretera en puntos de recarga públicos. Esto se traduce en los siguientes consumos:

Tabla 25. Consumos de gasolina y electricidad anuales en cada alternativa. Fuente: elaboración propia.

Año	HEV (L/año)	BEV (kWh/año)	
		Hogar	Carretera
2025	694	1.594	293
2035	475	1.299	239

Para 2025, se supone un coste sin impuestos de la gasolina renovable de 0,91 €/L, mientras que para 2035 se supone de 1,74 €/L, según datos de Argus [85], y Cores [39]. En cuanto al coste sin impuestos de la electricidad, se estima un coste de 0,19 €/kWh para una conexión doméstica de 8,05 kW, tanto para 2025 como 2035, y de 0,459 €/kWh para la recarga pública [86]. El coste de la electricidad para la recarga en el hogar se ha estimado a partir de datos de Red Eléctrica de España [87], suponiendo un precio del pool eléctrico de marzo 2023 a febrero 2024, pérdidas de red, peajes y cargos en la tarifa PVPC 2.0 TD.

A continuación, también habría que considerar los impuestos. Se van a considerar todos los siguientes:

- **Impuesto de matriculación**
- **Impuesto de circulación**
- **Impuesto especial sobre la gasolina renovable**
- **Impuesto especial sobre la electricidad**
- **IVA:** se va a imponer un 21% en todas las categorías, tanto para 2025 como 2035, las cuales son:
 - **IVA de adquisición del vehículo:** se le impone al total del coste del vehículo.
 - **IVA de adquisición del punto de recarga.**
 - **IVA de adquisición de la gasolina renovable:** se le impone tanto al coste de la gasolina renovable como al impuesto especial sobre la gasolina renovable.
 - **IVA de adquisición de la electricidad renovable:** se le impone tanto al coste de electricidad del hogar como al de electricidad en carretera, así como al impuesto especial de electricidad.
 - **IVA de las consideraciones restantes (mantenimiento y seguro).**



Otro punto importante a considerar son los intereses del préstamo. Se van a realizar 2 hipótesis:

- Un 75% del coste de adquisición del vehículo se financia. Esto incluye el coste del vehículo + el punto de recarga, el impuesto de matriculación, el IVA de adquisición del vehículo, y el IVA de adquisición del punto de recarga, según la Agencia Tributaria [88].
- El plazo de devolución del préstamo es de 5 años, con pagos anuales, para un total de 5 periodos.

Además, en base a simulaciones del BBVA [89], se estiman unos intereses de financiación al consumo del 7,85%.

Estas hipótesis son iguales para el vehículo eléctrico que para vehículo híbrido, y se mantienen en 2035, aunque los resultados son distintos por el diferente coste de adquisición del vehículo.

Por último, hay que considerar las subvenciones, presentes en 2025 por la adquisición del vehículo eléctrico, y que se suponen con el mismo valor en 2035. Para el híbrido, de momento no hay ninguna subvención. Según el Plan Moves III [90], la subvención a la adquisición de un BEV es de 7.000€. El tipo marginal del IRPF sería del 37% [91], cogiendo el del tramo entre 35.200€ y 59.999€, rango esperable del precio de venta del vehículo. Y la deducción en cuota del IRPF, del 15% del valor de adquisición del vehículo eléctrico (lo que incluiría de nuevo el coste del vehículo y del punto de recarga y el IVA de ambos, además del impuesto de matriculación), con un máximo de deducción de 3.000€ [92].

Para 2035, se supone esta misma subvención también para el híbrido de gasolina renovable. No se incluyen en 2025, porque el Plan MOVES no incluye aún una categoría de subvención para los HEV. El escenario que se propone para 2035 es que si sigue habiendo ayudas al BEV, también deberían de reconocerse para el combustible renovable, o bien desaparecer ambas.

A continuación, se incluyen todos los valores finales de las categorías explicadas.

Presentación y análisis de resultados

Empezando por el **coste del vehículo**, sin considerar la propulsión ni batería, FEV reporta un coste de 12.002€ para el vehículo híbrido, y 12.521€ para el vehículo eléctrico, muy similares ambos. Para el coste de la propulsión, en cambio, el híbrido tiene un coste reseñablemente superior, de 6.180€ frente a 3.850€ del BEV. No obstante, esto no descompensa el coste de la batería, que es lo que más computa en el BEV y es la razón principal de que el coste del vehículo eléctrico salga mayor al del híbrido. Este coste se queda en 6.300€ para el BEV, y apenas 330€ para el HEV, por su tamaño pequeño de batería, aunque el coste por kWh es superior al del vehículo eléctrico. Por último, los costes indirectos y de margen, en el HEV son el 30% de los costes de vehículo sin propulsión, de la propulsión y de la batería; mientras que en el BEV se suponen el 40%, según hipótesis de FEV. Estos costes se suman a todos los anteriores. El precio final de cada vehículo, con todas estas consideraciones, quedaría en 24.066€ para el HEV, y 31.739€ para el BEV. Esta diferencia de aproximadamente 8.000 € suele ser un factor importante para muchos consumidores a la hora de elegir un coche nuevo, lo que hace que gran parte de la población interesada en un vehículo eléctrico siga optando por continuar utilizando su ICEV antiguo, retrasando la renovación del parque de vehículos.

En cuanto a la estimación de estos datos para 2035, no hay una variación muy notoria, disminuyendo ligeramente el coste del vehículo sin propulsión, pero subiendo el coste de la batería. Los costes indirectos y de margen, como diferencia a los valores de 2025, tanto para el HEV como para el BEV en este caso se establece en un 30% de los costes sin propulsión, de la propulsión y de la batería.

En la siguiente tabla, se resumen los costes del vehículo en ambas alternativas.

Tabla 26. Costes del vehículo. Fuente: elaboración propia.

	2025		2035	
	HEV	BEV	HEV	BEV
Coste del vehículo y chasis (€)	12.002	12.521	11.862	12.472
Coste propulsión (€)	6.180	3.850	6.250	3.610
Coste batería (€)	330	6.500	320	7.000
Costes indirectos + margen (€)	5.554	9.068	5.530	6.925
Coste total vehículo	24.066	31.739	23.962	30.007

Por otro lado, el coste del punto de recarga es otro apartado en lo que el BEV da un resultado mayor, siendo de 1.281€, mientras que para el HEV es 0€, al no necesitar punto de recarga.



Otro punto relevante es el coste de la energía. Para la gasolina renovable, se calcula sabiendo los años de vida útil del coche (16), el consumo de gasolina anual (694 L), y el precio de la gasolina (0,91 €/L en 2025), quedando un valor de 10.146€.

$$\text{Coste energía HEV} = \text{Vida útil} \cdot \text{Consumo de gasolina anual} \cdot \text{Precio de la gasolina}$$

En 2035, este coste sube hasta 13.194€ sobre todo por la diferencia en el coste de la gasolina por litro (1,74€/L).

Para el vehículo eléctrico, se calcula el coste de la energía de forma análoga, separando coste de recarga en hogar y carretera, sabiendo el precio por kWh en ambas categorías, y el consumo anual, explicado en el apartado de metodología. Los resultados son los siguientes:

Tabla 27. Costes de energía. Fuente: elaboración propia.

	2025		2035	
	HEV	BEV	HEV	BEV
Coste gasolina renovable (€)	10.146	0	13.194	0
Coste electricidad hogar (€)	0	4.836	0	3.939
Coste electricidad carretera (€)	0	2.156	0	1.791
Coste energía (€)	10.146	6.992	13.194	5.731

Otro coste que es necesario considerar es el de mantenimiento, que es mayor en el vehículo híbrido que en el eléctrico. La estimación de FEV para este parámetro se queda en 7.280€ para el vehículo híbrido, y 4.460€ para el eléctrico, con la misma estimación para 2035.

Por otro lado, el coste del seguro, FEV [34] lo indica en 740,7€ anuales para el HEV, y 814,8€ para el BEV, quedando un coste final en vida útil de 11.851€ de coste para el HEV, y 13.037€ para el BEV.

Con todo esto explicado, quedaría un coste final del vehículo en su vida útil sin impuestos de 53.343€ para el HEV, y 57.510€ para el BEV. En 2035 en cambio, se queda en 56.286€ para el HEV, y 54.515€ para el BEV.

Tabla 28. Coste total sin impuestos. Fuente: elaboración propia.

	2025		2035	
	HEV	BEV	HEV	BEV
Coste vehículo sin propulsión (€)	12.002	12.521	11.862	12.472
Coste propulsión (€)	6.180	3.850	6.250	3.610
Coste batería (€)	330	6.500	320	7.000
Costes indirectos+margen (€)	5.554	9.068	5.530	6.925
Coste punto recarga (€)	0	1.281	0	1.281
Coste energía (€)	10.146	6.992	13.194	5.731
Coste mantenimiento (€)	7.280	4.460	7.280	4.460
Coste seguro (€)	11.851	13.037	11.851	13.037
Coste total sin impuestos (€)	53.257	57.510	56.286	54.515

A continuación, se consideran los impuestos que ya se indicaron en el apartado de metodología y cálculos:

- **Impuesto de matriculación:** este va a ser 0€, al considerar tanto al HEV como al BEV vehículos con unas emisiones en tubo de escape menores a 120 g/km de CO₂, como indica la normativa [93].
- **Impuesto de circulación:** cogiendo Madrid como ejemplo, el impuesto es de 179€ anuales para vehículos entre 16 y 19,99 caballos fiscales [94], entre los que suele estar un coche del Segmento C. El impuesto es el mismo para HEV que para BEV, y en los años de vida útil del coche, se iría a un total de 2.864€.
- **Impuesto especial sobre la gasolina renovable:** para 2025, se coge aún el impuesto especial de hidrocarburos (IEH), que se sigue aplicando también para los combustibles renovables de carretera, de 0,473 €/L para la gasolina [95]. Teniendo en cuenta que se consumen 694 L/año durante 16 años, el impuesto final sobre la gasolina renovable es de 5.250€.

Para 2035, se coge el impuesto de 0,15€/G que la Unión Europea ha propuesto para electricidad, biocombustibles avanzados y RFNBO en la Directiva de Impuestos a la Energía [96], aunque aún no se ha aprobado oficialmente. Esto se traduce en 0,005€/L, y por el cálculo análogo al del impuesto de 2025, se llega a un impuesto final en vida útil para la gasolina renovable de 37€.

- **Impuesto especial sobre la electricidad:** para 2025, se coge el tipo impositivo del 5,11%, establecido desde el 30/06/2024 [97]. Esto se traduce en 0,01 €/kWh, y sabiendo lo que consume anualmente tanto en recarga de hogar (1.594 kWh) y recarga en carretera (293 kWh), el precio final en vida útil es de 293€. Para 2035, por el mismo criterio que el impuesto sobre gasolina renovable, también aplicable a electricidad, y con un cálculo análogo al de 2025, se llega a un coste de 13€ para el BEV en 2035.

- **IVA:** como se comentó previamente, se va a suponer un IVA del 21% para 2025 y 2035 en todas las categorías, que son:
 - **IVA de adquisición del vehículo.**
 - **IVA de adquisición del punto de recarga.**
 - **IVA de adquisición de la gasolina renovable.**
 - **IVA de adquisición de la electricidad renovable.**
 - **IVA de las consideraciones restantes (mantenimiento y seguro).**

Con todo ello, queda un dato final de costes de impuestos de 20.401€ para el HEV en 2025 y 14.728€ en 2035; mientras que el BEV se queda en 15.354€ en 2025, y 14.328€ en 2035.

La tabla siguiente resume todos estos costes:

Tabla 29. Costes de impuestos. Fuente: elaboración propia.

	2025		2035	
	HEV	BEV	HEV	BEV
Impuesto matriculación (€)	0	0	0	0
Impuesto circulación (€)	2.864	2.864	2.864	2.864
Total impuestos vehículo (€)	2.864	2.864	2.864	2.864
Impuesto especial gasolina renovable (€)	5.250	0	37	0
Impuesto especial electricidad (€)	0	293	0	12
Total impuestos energía (€)	5.250	293	37	13
IVA adquisición vehículo (€)	5.036	6.665	5.032	6.301
IVA adquisición punto de recarga (€)	0	269	0	269
IVA adquisición gasolina renovable (€)	3.233	0	2.778	0
IVA adquisición electricidad renovable (€)	0	1.530	0	1.206
IVA mantenimiento y seguro (€)	4.018	3.674	4.018	3.674
Total IVA (€)	12.287	12.139	11.828	11.451
Costes impuestos (€)	20.419	15.295	14.728	14.328
Coste total con impuestos (€)	73.762	72.805	71.015	68.843

A continuación, se muestran los intereses del préstamo para cada vehículo y cada año con las hipótesis mencionadas anteriormente:

Tabla 30. Intereses del préstamo, subvenciones y coste final. Fuente: elaboración propia.

	2025		2035	
	HEV	BEV	HEV	BEV
Intereses préstamo (€)	5.402	7.412	5.378	7.023
Coste total con impuestos y financiación (€)	79.163	80.217	76.393	75.866
Subvención (€)	0	-7.410	-7.410	-7.410
Coste total final (€)	79.163	72.807	68.983	68.456

Por último, en cuanto a las subvenciones, en 2025 y 2035 se aplica la subvención de adquisición del vehículo BEV, explicada en la sección de la metodología, quedando un valor final de ayuda de 7.410€. Este mismo valor es el que también se aplicaría al HEV con combustibles renovables en 2035 asumiendo neutralidad en los criterios de apoyo a tecnologías de descarbonización que deberían implantarse. No se ha considerado para el HEV con combustible renovable en 2025, al no estar en vigor.

Con todos los datos calculados, el coste total de propiedad en la vida útil del HEV con gasolina renovable en 2025 asciende a 79.163 €, frente a los 72.807€ del BEV, diferencia que se explica principalmente por la subvención, de la que el HEV no se beneficia. En 2035, el BEV tiene un TCO equiparable al HEV con combustible renovable, con un coste de 68.456 €, frente a los 68.983 € del HEV.

A continuación, se incluye una gráfica resumen para visualizar los costes en todas las categorías, separando por colores para facilitar la visualización.

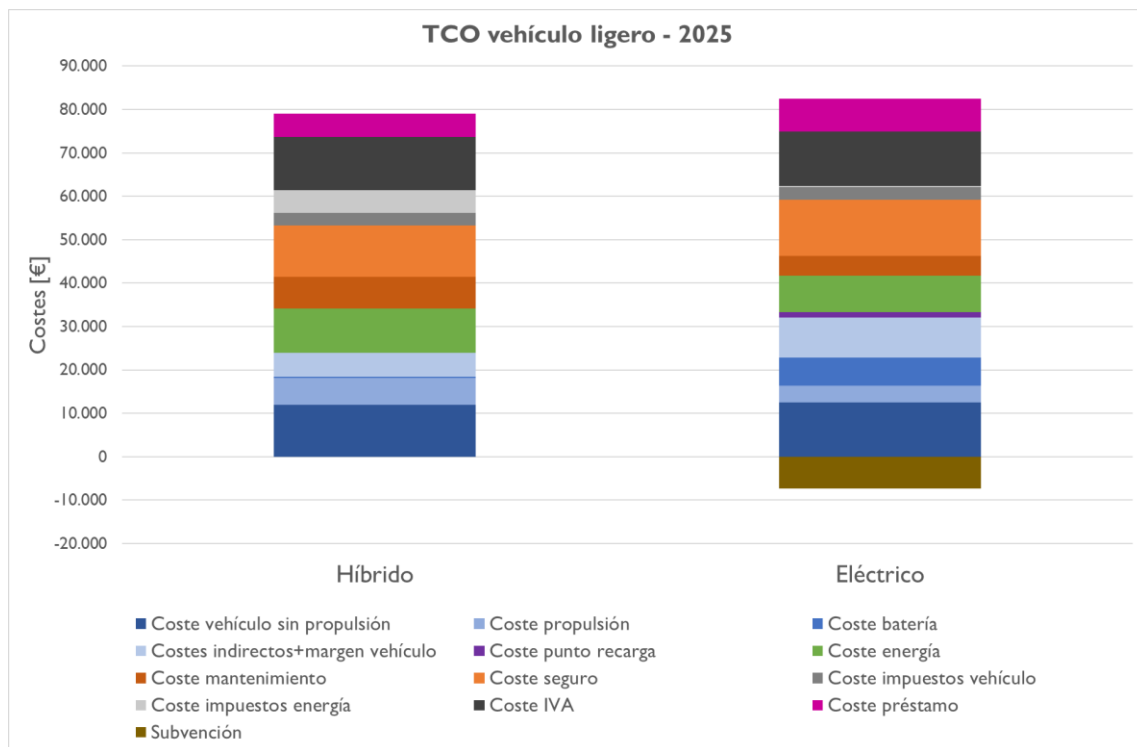


Figura 22. TCO - Comparativa 2025. Fuente: elaboración propia.

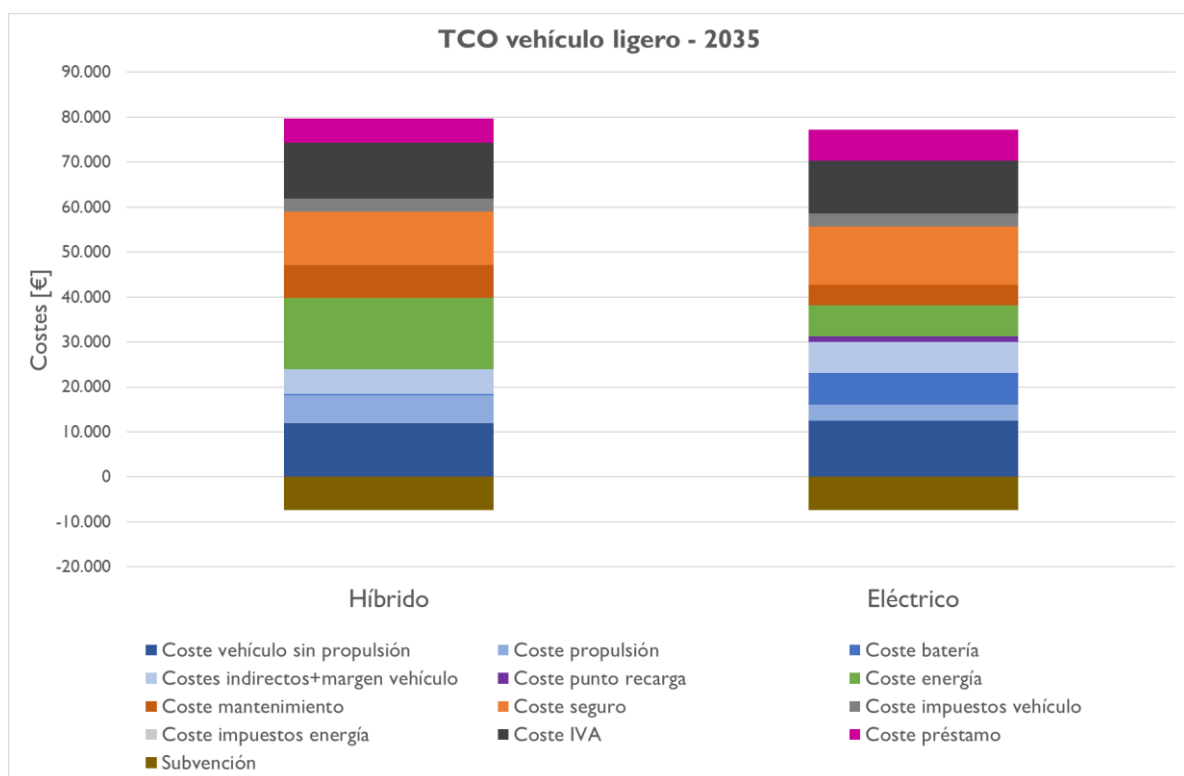


Figura 23. TCO - Comparativa 2035. Fuente: elaboración propia.



Conclusiones

Como se ha podido ver, aunque el HEV tenía un coste inicial del vehículo aproximadamente 8.000 € inferior, el análisis del TCO, incluyendo todos los conceptos (costes, impuestos y subvenciones) muestra que, a lo largo de la vida útil, las diferencias se reducen e incluso resultan ligeramente inferiores para el BEV. Esto sugiere que, aunque el coste inicial puede influir en la decisión de compra, es poco probable que el criterio del TCO por sí sólo sea decisivo para el consumidor a la hora de elegir entre ambas opciones, siéndolo en tal caso a favor del eléctrico, por los casi 6.000€ de diferencia en vida útil comprándolo en 2025. Esta conclusión es así, teniendo en cuenta aspectos regulatorios que hoy en día favorecen al BEV, como el impuesto a la energía y subvenciones que actualmente no aplican a los combustibles renovables. Si se hace la misma comparativa sólo considerando los costes (excluyendo impuestos y subvenciones o ayudas) la comparativa se compensa tanto en 2025 como en 2035, implicando que este criterio de TCO no debería ser un parámetro decisorio para apostar por una tecnología o descartar a otra.

Conviene comentar que, según ACEA, España es el segundo país de la UE que menos impuestos recauda en total por vehículo, sólo por detrás de Grecia [98]. Esto implica que el efecto de los impuestos sobre el TCO es relativamente reducido, viéndose limitada la ventaja fiscal del BEV, que paga menos impuestos que el HEV. Al trasladar este análisis a otro país europeo, es previsible que el eléctrico se beneficie proporcionalmente más, haciéndose más competitivo frente al híbrido que en España. Los costes de energía y mantenimiento, en cambio, no dependen del país salvo diferencias en precios locales, por lo que la tendencia del TCO respecto a estos costes no cambiaría radicalmente.

No obstante, resulta paradójico que el análisis del TCO se emplee a menudo para evaluar o justificar la competitividad de los vehículos híbridos frente a los eléctricos puros, cuando buena parte de la diferencia económica observada no se debe a factores intrínsecos de las tecnologías, sino a la influencia de las subvenciones y los incentivos públicos que se aplican exclusivamente a los BEV. En este sentido, puede afirmarse que el menor TCO del vehículo eléctrico no siempre refleja una ventaja tecnológica o de eficiencia real, sino más bien el efecto de un marco de apoyo político orientado a acelerar su adopción. Esto pone de relieve la necesidad de interpretar los resultados del TCO teniendo en cuenta las condiciones regulatorias y fiscales vigentes, especialmente si se pretende realizar una comparación justa y neutral entre diferentes tecnologías de propulsión.



Seguridad de suministro

Abundancia del recurso energético

Contexto

En esta parte del estudio, se analizará fundamentalmente la disponibilidad de materias primas para la producción de biocombustibles. En el caso de los vehículos eléctricos y de los combustibles sintéticos, la disponibilidad de materia prima no está limitada por factores geológicos o de agotamiento físico, como sí ocurre con los combustibles fósiles o los biocombustibles. Tanto la electricidad renovable como el agua y el CO₂ son recursos presentes en cantidades potencialmente ilimitadas a escala global, aunque su aprovechamiento efectivo depende de la capacidad de generación, conversión y distribución desarrollada.

En consecuencia, al comparar los vehículos eléctricos con los de combustión alimentados con combustibles renovables, estos últimos podrían enfrentar restricciones si la disponibilidad de materia prima no es suficiente para producir biocombustibles que, junto con la aportación de los RFNBO, permitan cubrir la demanda de combustible en los próximos años.

Existe una preocupación especial por la limitación de materia prima para abastecer el transporte por carretera, especialmente en un contexto en el que se está dando prioridad a sectores difíciles de electrificar como el de aviación o el marítimo. Por tanto, el análisis de este trabajo busca aproximarse, de manera objetiva y a partir de estudios existentes, a la disponibilidad de materia prima para la descarbonización del transporte por carretera.

Antecedentes y metodología

Existen diversos estudios publicados en los últimos años que analizan la disponibilidad de biomasa para biocombustibles en la Unión Europea. Para la realización de esta sección, se analizará información de varios de ellos.

Un estudio es el del Imperial College London, de 2021 [99], que estima la disponibilidad de materias primas para biocombustibles en varios escenarios a 2030 y 2050, tanto a nivel general europeo como desglosado por países. No obstante, el informe no concreta la disponibilidad de materias primas exclusivamente para transporte por carretera, indicando el potencial de biomasa para todos los usos energéticos (transporte, calefacción y electricidad).



Para el caso europeo, los resultados se van a comparar con el consumo de productos petrolíferos en la UE en el sector transporte en 2023, según Fuels Europe [100]. Mientras que, para el caso español, los resultados se van a comparar con la actual demanda de combustibles fósiles en 2024, según Cores [39], pero para todos los usos energéticos, al no haberse encontrado la demanda exclusivamente para transporte.

El informe muestra datos para diversas materias primas presentes en el Anexo IXA y el IXB de la RED II, es decir no tiene en cuenta aceites alimentarios con los que se producirían biocombustibles de primera generación, que están más restringidos. Como estimación del propio informe, a los IXA se les supone un rendimiento de materia prima a combustible del 21 y 40% (2025 y 2035, respectivamente), mientras que para el IXB (UCO y grasas animales), del 85%.; Para el caso español, se mantiene el rendimiento del 85% en los IXB, pero se baja a 40% en los IXA. Para facilitar la visualización, todas estas materias primas se dividen entre UCO, residuos elegibles y cultivos lignocelulósicos.

Otro informe de la Comisión Europea, de 2024 [101], compara el potencial de producción de biomasa para biocombustibles avanzados respecto a la demanda energética proyectada para 2030 y 2050 tanto para el total del transporte (incluido carretera, marítimo y aéreo) como para electricidad y calor. La biomasa considerada cubre la presente en el Anexo IX de la RED III (tanto del IXA como del IXB), alguna adicional clasificada de bajo riesgo ILUC, y otras categorías nuevas propuestas en los borradores de modificación del anexo IX. Este estudio indica que el potencial técnico de biomasa avanzada en la UE es alto, pero el potencial movilizable (o disponible para biocombustibles) depende fuertemente de la intensidad de movilización. Para ello da un escenario bajo, uno medio, y otro alto. La demanda proyectada incluye todas las fuentes de energía renovable, es decir, electricidad renovable, RFNBOs y biocombustibles.

A la hora de utilizar los resultados de este informe, éstos se van a recalcular utilizando los mismos rendimientos de materia prima a combustible del informe del Imperial College [99], ya que el informe de la Comisión Europea desglosa el potencial general de biomasa, pero para hacer la comparativa lo más correcta posible, habría que comparar la demanda con el potencial técnico energético final de los biocombustibles derivados de esa biomasa.

Otros informes interesantes que también estiman la disponibilidad de biomasa en entornos europeos son uno del Politécnico de Turín [102], que da información sobre cultivos en España para hacer biocombustibles, uno de OGCI [103], aunque centrado en el sector marítimo, y una herramienta de KDF [104] que estima la biomasa que se producirá en cada país en los próximos años.

No obstante, como se puede observar, ninguno de los estudios analizados desagrega la demanda o disponibilidad de biomasa para los distintos tipos de transporte, tratándola de manera conjunta para carretera, transporte marítimo y aéreo.

Presentación y análisis de resultados

Empezando por el estudio del Imperial College London [99], los resultados a nivel europeo y español en megatoneladas anuales, además de la demanda actual de combustible fósil, son los siguientes:

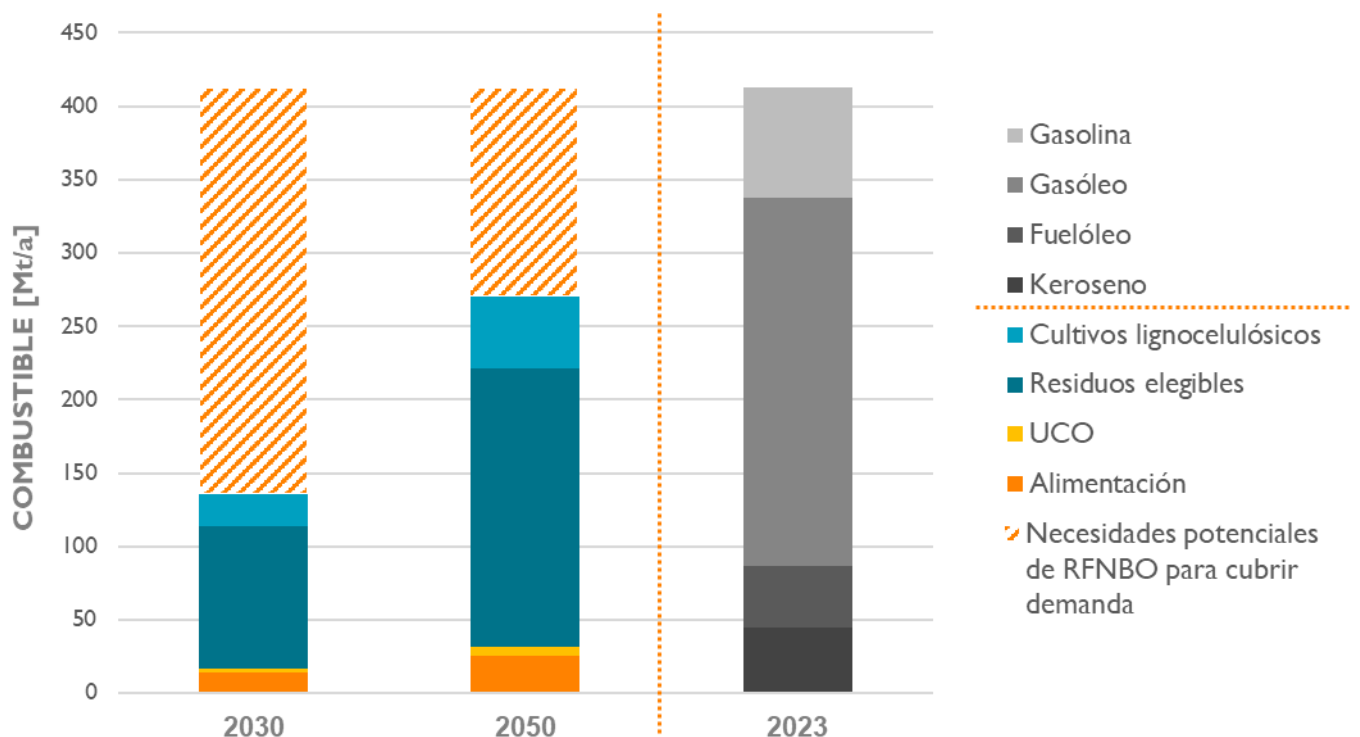


Figura 24. Potencial de producción de combustibles renovables en la UE y demanda actual de combustible fósil en el sector transporte. Fuente: elaboración propia a partir del Imperial College London [99] y Fuels Europe [100].

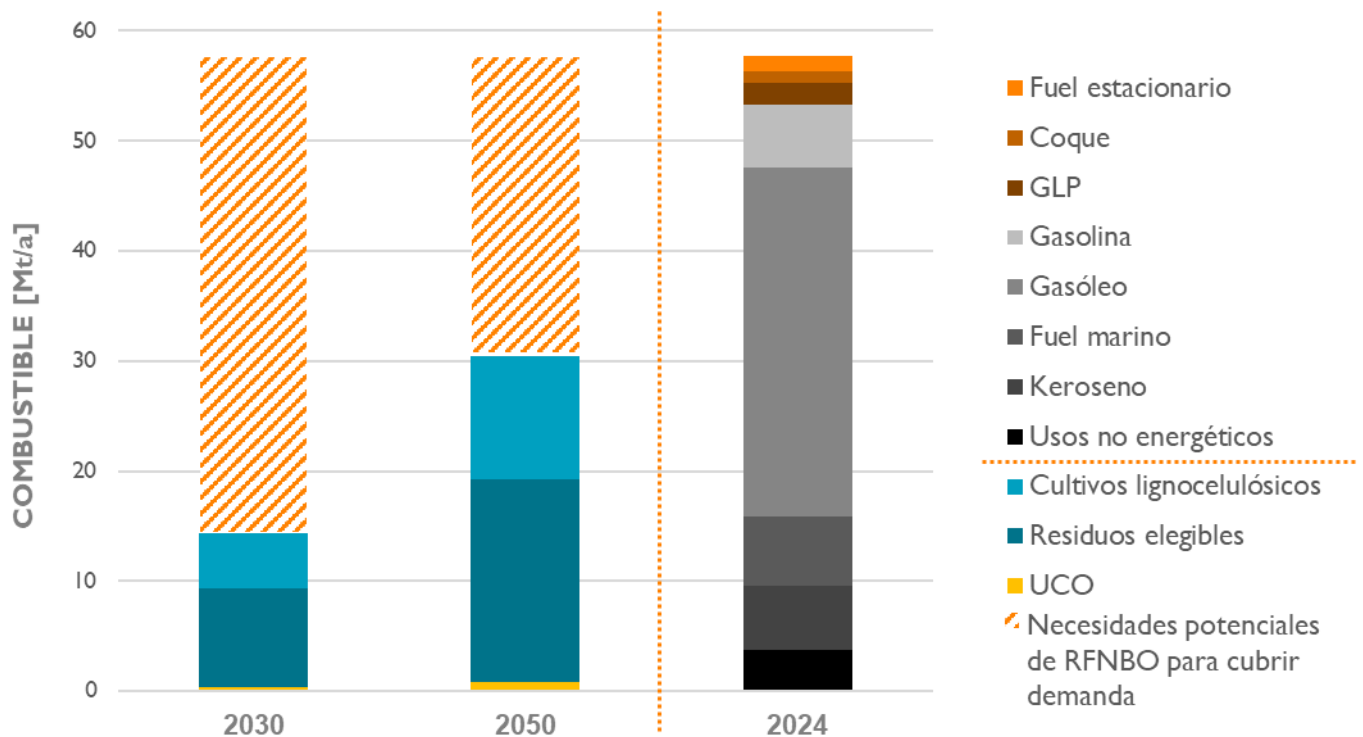


Figura 25. Potencial de producción de combustibles renovables en España y demanda actual de combustible fósil en todos los sectores. Fuente: elaboración propia a partir del Imperial College London [99] y Cores [39].

Se puede observar que el UCO, la materia prima más utilizada actualmente para producir HVO, tiene un potencial bastante limitado actualmente y a futuro, por lo que su uso se debe de ir complementando con la utilización de otro tipo de residuos forestales como la paja de cereales, el estiércol o residuos de madera.

Entre todas las materias primas analizadas, en la UE se estima que sería posible cubrir alrededor del 30% de la demanda de combustibles del transporte (carretera, aviación y marítimo) en 2030, y cerca del 65% en 2050, tomando como referencia la demanda total registrada en 2023.

En el caso de España, la cobertura es algo menor, aunque en este caso la comparación se realiza frente a la demanda total de combustibles, incluyendo sectores ajenos al transporte.

La demanda restante podría cubrirse con la producción de RFNBO, cuya disponibilidad de materia prima es potencialmente ilimitada, como se mencionó previamente. No obstante, disponer de materia prima no garantiza la producción inmediata: para fabricar estos combustibles, al igual que los bios, sería necesario desarrollar una capacidad industrial considerable, con numerosas plantas aún por construir.

En cuanto a la localización geográfica en la UE de la biomasa disponible para producir biocombustibles, se puede ver en el siguiente gráfico, también según el estudio del Imperial College [99], que España es actualmente la tercera potencia con mayores recursos, sólo por detrás de Francia y Alemania, siendo la mayor en cultivos lignocelulósicos.

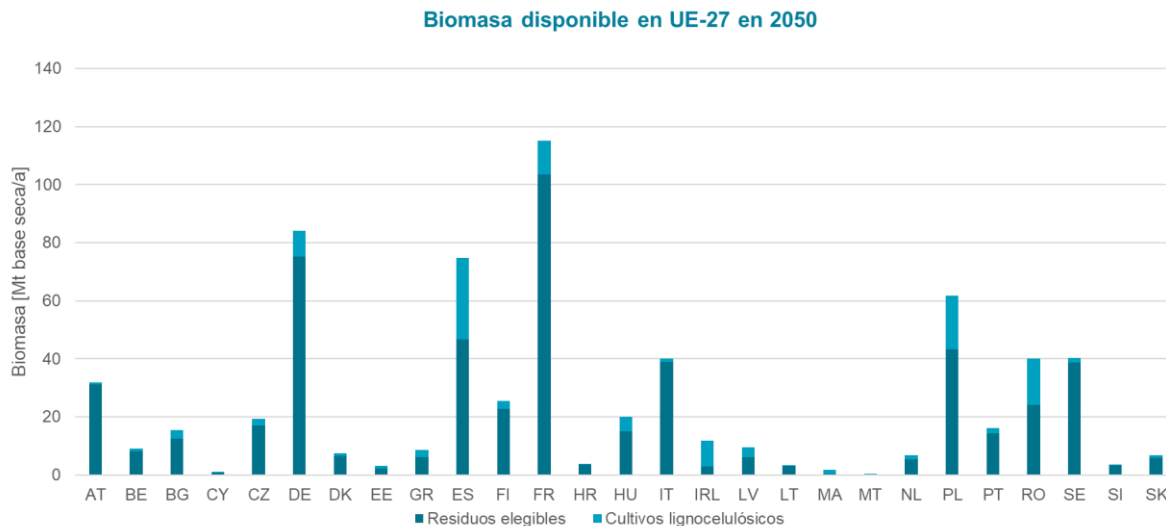


Figura 26. Biomasa para biocombustibles disponible por país de la UE en 2050. Fuente: Imperial College London [99].

Por otro lado, se muestran los resultados del informe de la Comisión Europea [101], que realiza estimaciones a 2030 y 2050 en la UE para el potencial técnico de biomasa y el potencial movilizable en el escenario bajo, medio y alto, en comparación con la demanda proyectada tanto para transporte como para electricidad y calor, en MTOE (millones de toneladas equivalentes de petróleo). Los resultados aparecen ya recalculados utilizando el rendimiento de materia prima a combustible previamente comentado:

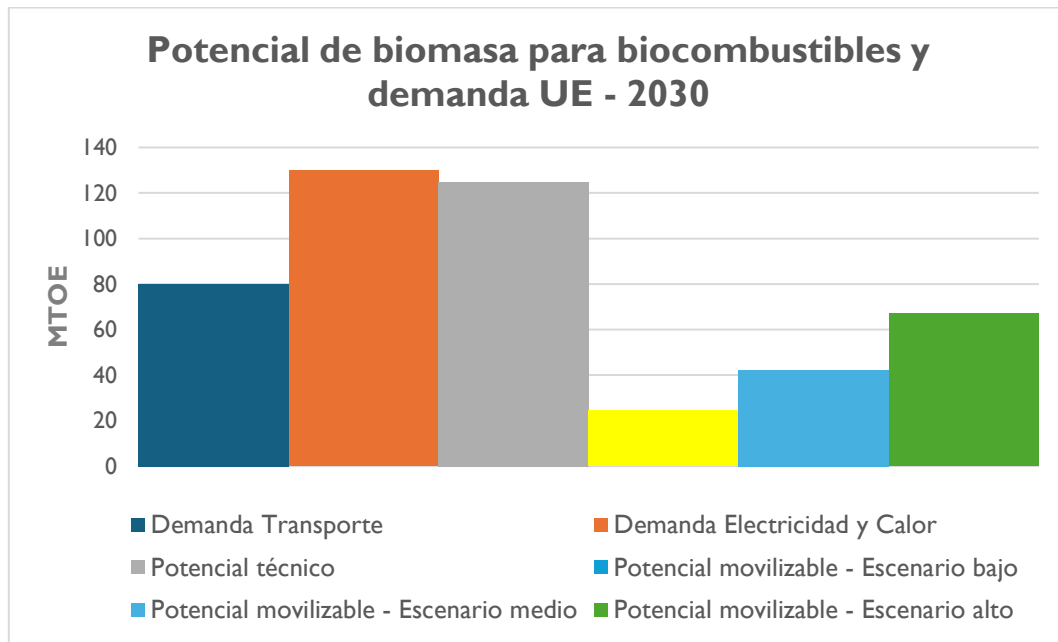


Figura 27. Potencial de biomasa para biocombustibles y demanda UE – 2030. Fuente: elaboración propia a partir del informe de la Comisión Europea [101].

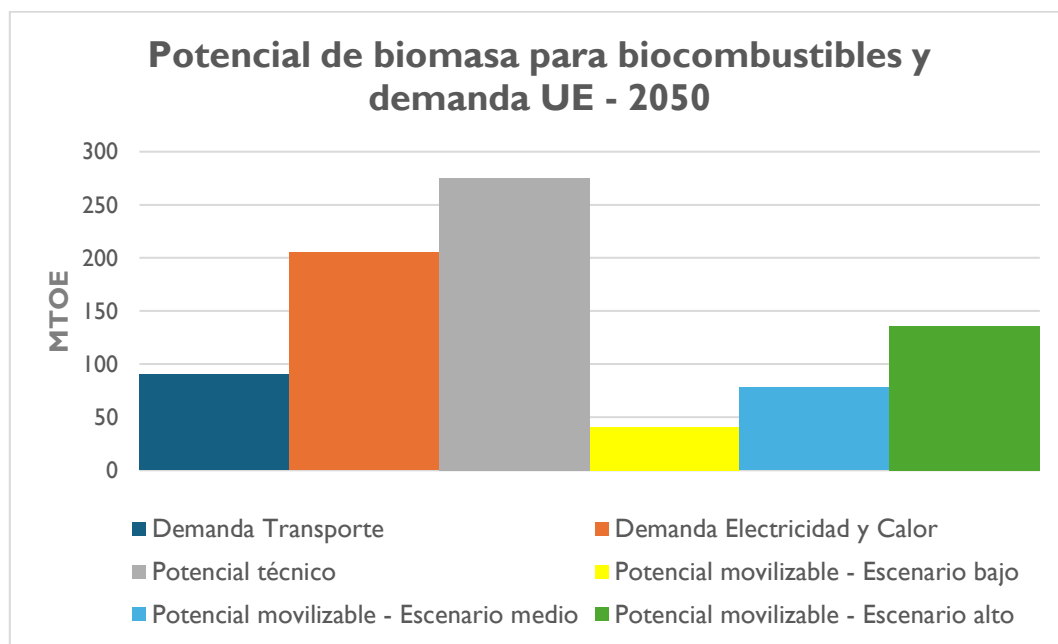


Figura 28. Potencial de biomasa para biocombustibles y demanda UE – 2050. Fuente: elaboración propia a partir del informe de la Comisión Europea [101].



Se observa que, bajo el escenario medio, el potencial de biomasa del Anexo 9 en 2030 no sería suficiente para cubrir la demanda destinada al transporte, aunque el escenario alto se acercaría a ese nivel. En 2050, sin embargo, el escenario alto sí lograría cubrir dicha demanda, mientras que el escenario medio quedaría muy próximo a hacerlo.

En cambio, en 2030, el potencial técnico de biomasa supera ampliamente la demanda del transporte, y también excede la demanda de electricidad y calor en 2050. Esto demuestra que la competencia con otros usos no energéticos (como materiales o productos químicos) y los criterios de sostenibilidad pueden reducir drásticamente la disponibilidad.

El informe además indica que fracciones de biomasa como la líquida (estiércol y lodos, muy útil para hacer biogás) y los residuos agrícolas están subexplotados y podrían aportar mucho más si se despliega la tecnología para ello y se aplican políticas de incentivo. Por otro lado, se indica que las fracciones de aceites usados y grasas animales ya están bastante explotadas, con menos margen de crecimiento. Y que los residuos y subproductos forestales aportan una parte significativa del recurso, pero están sujetos a fuertes condicionantes de sostenibilidad y usos competidores (materiales, papel, etc.) [101].

Entre las soluciones propuestas, el estudio destaca precisamente enfocar el desarrollo en categorías de biomasa infrautilizadas, aumentando además la producción en tierras degradadas y abandonadas. También propone entre otras cosas explorar el potencial de las algas como materia prima para 2050, o ajustar los escenarios de demanda de biomasa en sectores no energéticos, como el textil o el de químicos intermedios, con el fin de evitar depender de las importaciones de fuera de la UE.

Conclusiones

Del análisis realizado se desprende que, aunque la Unión Europea y España cuentan con un potencial de biomasa considerable, la disponibilidad real de materia prima movilizable para biocombustibles avanzados es más limitada. Las fracciones actualmente más utilizadas, como los aceites usados y las grasas animales, presentan un margen de crecimiento reducido, por lo que será necesario avanzar hacia el aprovechamiento de residuos agrícolas, forestales y cultivos lignocelulósicos, todavía infrautilizados, pero con un potencial de expansión relevante. Se puede observar en los escenarios de la Comisión Europea [101] que el potencial de biomasa para biocombustibles será cada vez mayor, aunque también lo será la demanda.



Los estudios revisados indican que la biomasa disponible para biocombustibles en la UE podría cubrir en torno a un 30-50% de la demanda energética para el sector transporte en 2030, acercándose al 100% en 2050. Comparando con la demanda de biocombustibles en todos los sectores, en cambio, la cobertura apenas llega al 20-30%. Esto implica que será necesario complementar a los biocombustibles con otras fuentes de energía como la electricidad renovable y los RFNBO, aunque su papel seguirá siendo muy importante en la descarbonización del sector.

Conviene señalar que los informes analizados no desagregan el uso de biomasa por tipo de transporte, de modo que las estimaciones se refieren al conjunto de los sectores energético y de movilidad, resultando complicado extraer una estimación específica para el transporte por carretera. Por lo tanto, un reto adicional será equilibrar el uso de los recursos limitados de biomasa entre los distintos modos de transporte.

En particular, la aviación y el transporte marítimo presentan mayores dificultades para electrificarse y podrían absorber progresivamente una proporción mayor de los biocombustibles avanzados disponibles, aunque su demanda energética conjunta seguramente sea mucho menor que la potencial disponibilidad de biocombustibles analizados, teniendo en cuenta que, actualmente, el 95% del consumo de combustible fósil lo absorbe el transporte por carretera [105]. Es decir, en base a los resultados analizados, no hay evidencias que demuestren que el sector del transporte por carretera no se pueda descarbonizar con biocombustibles sin comprometer el suministro para los sectores aéreo y marítimo.

En resumen, el gran desafío para lograr la producción prevista de biocombustibles en 2030 y 2050 consiste, por un lado, en mejorar la gestión y recogida de los residuos que servirán como materia prima, y por otro, en construir y poner en marcha las plantas necesarias para alcanzar dicha capacidad de producción.



Eficiencia en el uso de electricidad renovable

Contexto

Existe una preocupación en el sector por la demanda de energía eléctrica renovable necesaria para la descarbonización de la movilidad, en especial por la ruta de los e-fuels. Aunque los vehículos de combustión alimentados con este combustible mostraron menores emisiones de gases de efecto invernadero por kilómetro que los vehículos eléctricos, como se observó en la sección correspondiente de este estudio, estos presentan una eficiencia energética significativamente inferior.

Como consecuencia, recorrer la misma distancia con un combustible sintético que con otra opción de movilidad requiere mayor cantidad de electricidad en todo su ciclo de producción, lo que implica un uso más intensivo de recursos energéticos y condiciona la viabilidad y sostenibilidad del sistema energético a largo plazo.

Por tanto, evaluar la eficiencia en el uso de la electricidad constituye un complemento fundamental al estudio de emisiones y permite hacer una comparativa entre las diferentes opciones, así como identificar oportunidades de optimización en las diversas rutas de descarbonización del transporte por carretera. Además, la eficiencia en el uso de la energía eléctrica renovable tiene un impacto directo en otros criterios analizados:

- **TCO:** el coste de los e-fuels (no analizado en el presente trabajo) está muy vinculado al coste de la producción del hidrógeno electrolítico y éste al coste de la electricidad renovable. Por tanto, un análisis de las tecnologías para incrementar la eficiencia en el uso de la energía eléctrica renovable tendrá un impacto considerable en la partida del coste de la energía del TCO.
- Un menor consumo de electricidad renovable también tendrá impactos en otros criterios como el consumo de agua azul o la demanda de capacidad adicional de generación de electricidad renovable (y uso de suelo).

Antecedentes

En relación con los estudios bibliográficos que analicen la eficiencia energética eléctrica en vehículos con diferentes combustibles renovables, al igual que en otras secciones, la información es bastante escasa. Lo más relevante que hay disponible son estudios centrados en e-fuels, como el de Transport & Environment (T&E) [106] que analiza la eficiencia de diferentes tecnologías de movilidad: un vehículo con e-diesel, otro con e-gasolina (“petrol”), otro de hidrógeno electrolítico, y otro eléctrico. El estudio considera 2 escenarios temporales, 2020 y 2050, aunque no especifica si los vehículos de combustión son ICEV o HEV. Los resultados son los siguientes:

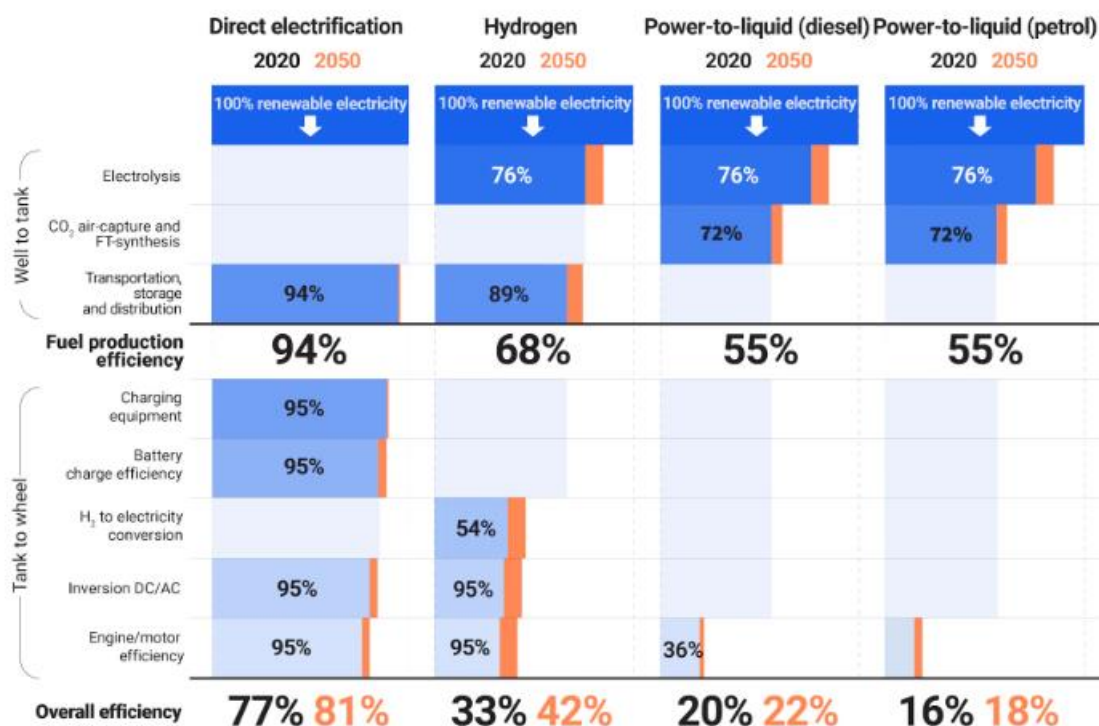


Figura 29. Eficiencia energética para diferentes opciones de movilidad. Fuente: T&E [106].

El diagrama que presenta T&E se divide en las diferentes etapas de producción de energía y consumo final en el vehículo. Observando la eficiencia final del uso de la energía eléctrica, en un coche eléctrico se aprovecha el 77% de la electricidad que se consume, subiendo al 81% en un escenario a 2050. En uno con e-diesel, en cambio, la eficiencia baja al 20-22%, mientras que la e-gasolina muestra los peores resultados, con apenas un 16% en 2020 y 18% en 2050. En consecuencia, se observa que los vehículos de combustión interna alimentados con combustibles sintéticos presentan una penalización significativa en términos de eficiencia eléctrica respecto a los BEV.



El propósito de esta sección, en la que se analizará la eficiencia en el uso de electricidad renovable en distintas tipologías de vehículos, será, por tanto, no sólo contrastar los resultados obtenidos con otros estudios como el de T&E, sino también explorar posibles vías de mejora futura en cada alternativa tecnológica.

Metodología y criterios aplicados

Con el fin comentado previamente, se va a hacer una estimación por elaboración propia del gasto energético eléctrico por km recorrido de un coche eléctrico frente a uno híbrido de gasolina con combustible renovable e-fuel, desde la producción de la propia electricidad renovable hasta el propio gasto en el coche al circular. Se coge la ruta de los e-fuels como caso extremo con mayor previsión de gasto eléctrico por km recorrido, pero para observar la tendencia de otros combustibles renovables, se analizará también un caso de un vehículo ICEV de diésel, propulsado por diésel bio (HVO). En este análisis se considera únicamente el consumo eléctrico, sin incluir la energía térmica, ya que el objetivo es comparar la dependencia de electricidad renovable entre las rutas estudiadas, reflejando el vector energético en el que se están centrando los esfuerzos de descarbonización y las políticas públicas en escenarios de transición energética.

La ruta de los e-fuels que se va a analizar consiste en la captura de CO_2 por DAC (*Direct Air Capture*, Captura Directa del Aire) e H_2 producido por electrólisis alcalina, con un posterior RWGS (*Reverse Water Gas Shift*, una reacción que convierte el CO_2 y el H_2 en CO), un FT (*Fischer-Tropsch*) y su upgrading al combustible final. Por otro lado, en el ejemplo con el HVO, se usará UCO como materia prima, como en anteriores secciones.

En los tres casos analizados se considerarán escenarios futuros con mejoras de eficiencia. Para los dos vehículos que utilizan combustibles renovables, se estimarán mejoras tanto en el proceso de producción del combustible como en el consumo energético del vehículo. En el caso del BEV, las mejoras se aplicarán únicamente a esto último. Por la mayor disponibilidad de datos bibliográficos sobre la transmisión de electricidad en las redes eléctricas, se asume que los vehículos circulan en España.

Los consumos que se van a estimar en cada caso, por tanto, son los siguientes:

Tabla 31. Escenarios considerados en el estudio de eficiencia en el uso de la electricidad renovable. Fuente: elaboración propia.

	Consumos estimados de energía eléctrica	Escenario Optimización proceso	Escenario Optimización vehículo
ICEV - HVO	- Consumo energético por km en el vehículo - Consumo eléctrico en logística y suministro - Consumo eléctrico en la producción del HVO - Consumo eléctrico en la producción de hidrógeno (gris) - Consumo eléctrico en el transporte y suministro de la electricidad	Sí	Sí
HEV – e-Gasolina	- Consumo energético por km en el vehículo - Consumo eléctrico en logística y suministro - Consumo eléctrico RWGS + FT + Upgrading - Consumo eléctrico en la producción de hidrógeno (H₂ verde por electrólisis) - Consumo eléctrico en el transporte y suministro de la electricidad	Sí	Sí
BEV	- Consumo energético por km en el vehículo - Consumo eléctrico en el suministro a baja tensión - Consumo eléctrico en el almacenamiento de electricidad (se almacena un 30%)	No aplica	Sí



Para saber las pérdidas en la red de baja y de alta tensión, se usan datos de la CNMC [107], que son los siguientes:

Tabla 32. Pérdidas de energía en la red eléctrica. Fuente: CNMC.

Pérdidas	Valor
Red de alta tensión (A.T.)	1,65%
Red de baja tensión (B.T.)	17,29%

A continuación, se presentará el cálculo que se ha realizado por elaboración propia, con el fin de analizar en más detalle etapa por etapa, y comparar los resultados finales con los de T&E.

Presentación y análisis de resultados

Ruta ICEV diésel bio

En este caso, se analizará el consumo energético por km recorrido de un ICEV de diésel con HVO, producido a partir de UCO. En este caso, el escenario contemplado de optimización del proceso consiste en el cambio de hidrógeno gris por verde (la legislación actual no obliga a que el hidrógeno empleado en la producción de HVO tenga que ser verde, aunque su uso reducirá aún más la huella de carbono de este biocombustible), y para la optimización de la eficiencia del vehículo, se realiza la suposición de que el consumo de combustible por km recorrido se reduce en el mismo % que para el HEV de gasolina. Esta es la primera vez en todo el trabajo que se aplica un escenario futuro al ICEV de diésel, ya que, según las tendencias del mercado y la normativa vigente, se prevé una disminución progresiva de las ventas de estos vehículos. No obstante, se incluye este escenario con el objetivo de permitir una comparativa homogénea en esta sección.

El diagrama de flujo de este proceso es el siguiente:

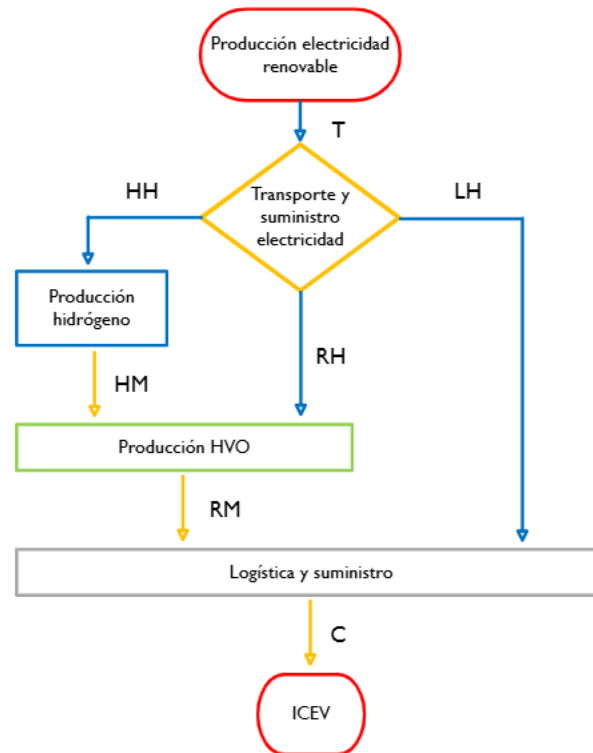


Figura 30. Diagrama de flujo de la energía eléctrica de la ruta de HVO en un ICEV. Fuente: elaboración propia.

En la siguiente tabla, se explica el significado de cada sigla del diagrama, y su valor en el escenario actual de cada parámetro por km recorrido del vehículo, en el futuro con el proceso optimizado, y en el futuro con la optimización de proceso y vehículo. Las fuentes indicadas presentan las eficiencias necesarias para calcular los consumos de electricidad o hidrógeno necesarios para hacer el análisis.

Tabla 33. Consumos en el proceso de conducción de un ICEV con HVO. Fuente: elaboración propia.

Sigla	Significado	Consumo actual	Optimización proceso	Optimización proceso + vehículo	Fuente
C	Consumo másico de combustible (kg/km)	0,041	0,041	0,028	IDAE [33] JEC [46] Suposición propia
LH	Consumo eléctrico en logística y suministro (kWhe/km)	0,0023	0,0023	0,0016	JEC [46]
RM	Consumo másico de combustible (kg/km)	0,041	0,041	0,028	IDAE [33] JEC [46] Suposición propia
RH	Consumo eléctrico en la producción de HVO (kWhe/km)	0,005	0,005	0,004	Ewaba [108]
HM	Consumo másico de hidrógeno (kg H ₂ /km)	0,002	0,002	0,001	Ewaba [108]
HH	Consumo eléctrico producción de hidrógeno (kWhe/km)	0,002	0,081	0,055	CHP [109]
T	Consumo global de electricidad renovable (kWhe/km)	0,009	0,09	0,06	CNMC [107]

Para el escenario actual de producción de hidrógeno por reformado por vapor (hidrógeno gris), se coge información de la IEA [110]. Para los dos escenarios futuros, se coge la información de la CHP [109] para un electrolizador SOEC.

Para obtener el dato final del consumo global de electricidad renovable en todo el proceso, habría que tener en cuenta las pérdidas en la red eléctrica de alta y baja tensión, es decir en el transporte y suministro de la electricidad. En el caso del dato del consumo en la producción de hidrógeno y del HVO, corresponde considerar las pérdidas en red de alta tensión, dado que estos procesos suelen estar conectados a esta red. Por otro lado, para el consumo en logística y suministro del combustible, es más apropiado tener en cuenta las pérdidas en la red de baja tensión, al tratarse de un uso más próximo al consumidor final:

$$T = A.T.* (HH + RH) + B.T.* LH \quad (2)$$

Como se puede observar, el consumo energético eléctrico de esta ruta (0,009 kWh/km) es bastante bajo. Entre el escenario actual y el del proceso optimizado se observa una subida en el consumo, ya que la producción de hidrógeno electrolítico requiere de una mayor electricidad que la producción de hidrógeno gris. En el escenario con la optimización en el consumo de combustible del vehículo, vuelve a disminuir el resultado, pero pese a ello se mantiene superior al caso actual.

Esto demuestra que la ruta actual de producción de HVO a partir de hidrógeno gris es muy poco intensiva en electricidad renovable. Sin embargo, en un escenario en el que se contemple el empleo de hidrógeno electrolítico, la huella de carbono se reduciría, aunque, paradójicamente, el consumo de electricidad renovable aumentaría.

Ruta HEV de gasolina con e-fuel

En esta ruta, como se comentó previamente, se va a analizar el consumo energético por km recorrido de un HEV de e-gasolina, partiendo de CO₂ capturado por DAC y H₂ electrolítico producido en un electrolizador alcalino. La ruta incluye el RWGS y la síntesis de FT. También se incluyen 2 escenarios futuros: uno en el que se optimiza el proceso de producción de la e-gasolina, y otro en el que se optimiza tanto el proceso como la eficiencia del vehículo.

El diagrama de flujo de este proceso es el siguiente:

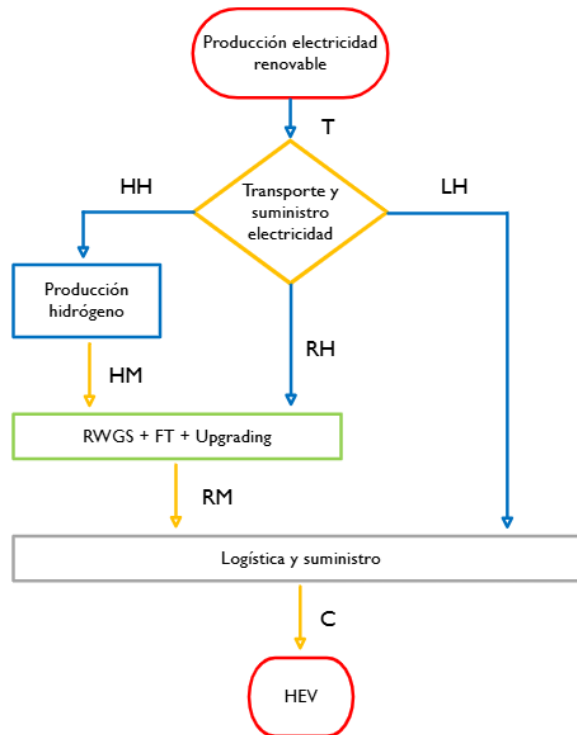


Figura 31. Diagrama de flujo de la energía eléctrica de la ruta e-fuel en HEV. Fuente: elaboración propia.

En la siguiente tabla, se muestra el consumo en el escenario actual de cada parámetro por km recorrido del vehículo, en el futuro con el proceso optimizado, y en el futuro con la optimización de proceso y vehículo.

Tabla 34. Consumos en el proceso de conducción de un HEV con e-fuel. Fuente: elaboración propia.

Sigla	Significado	Consumo actual	Optimización proceso	Optimización proceso + vehículo	Fuente
C	Consumo másico de combustible (kg/km)	0,041	0,041	0,028	IDAE [33] JEC [46] FEV [34]
LH	Consumo eléctrico en logística y suministro (kWhe/km)	0,0023	0,0023	0,0016	JEC [46]
RM	Consumo másico de combustible (kg/km)	0,041	0,041	0,028	IDAE [33] JEC [46] FEV [34]
RH	Consumo eléctrico RWGS+FT+Upgrading (kWhe/km)	0,295	0,295	0,202	Concawe ⁵ [40]
HM	Consumo másico de hidrógeno (kg H ₂ /km)	0,02	0,02	0,014	Concawe [40]
HH	Consumo eléctrico producción de hidrógeno (kWhe/km)	0,996	0,752	0,515	CHP [109]
T	Consumo global de electricidad renovable (kWhe/km)	1,315	1,067	0,73	CNMC [107]

El único cambio en el escenario de optimización del proceso es el consumo eléctrico en la producción de hidrógeno. En el escenario actual se usa un electrolizador alcalino, mientras que, en el escenario futuro, se usa una electrólisis SOEC, cuyo consumo eléctrico es menor [109]. Por otro lado, el único cambio en el caso de optimización del vehículo parte de la suposición de consumo futura de combustible que se ha supuesto, de 3,8 L/100 km, según FEV [34], y que termina afectando al resto de etapas. El dato final del consumo global de electricidad renovable en todo el proceso se calcula de forma análoga al ICEV.

Como se puede ver en la Tabla 34, la producción total de electricidad es de 1,315 kWhe/km en el escenario actual, mejorando hasta 1,067 en un escenario con el proceso optimizado, y a 0,73 kWhe optimizando también el consumo de combustible en el vehículo. Todos los resultados dan considerablemente mayores al ICEV con diésel bio, lo que evidencia la elevada dependencia de electricidad de esta ruta, en especial debido a la producción del hidrógeno.

⁵ Concawe hace los cálculos para producir e-diésel, y en este trabajo se está buscando una e-gasolina, pero por simplificación y falta de más datos bibliográficos, se estima que el consumo para producir una e-gasolina será similar.

Ruta BEV

En el vehículo eléctrico, como se comentó anteriormente, se tendrá en cuenta el consumo energético para mover el vehículo, el consumo en el suministro a baja tensión, y el consumo en el almacenamiento de electricidad renovable en la red. Sólo se asume un escenario optimizado futuro, consistente en la mejora en el consumo energético en el vehículo, según FEV [34], de los 15,1 kWh/100 km actuales a los 12,3 kWh/100 km futuros, como se ha supuesto en todo el trabajo.

El diagrama de flujo de este proceso y la tabla de consumos es la siguiente:

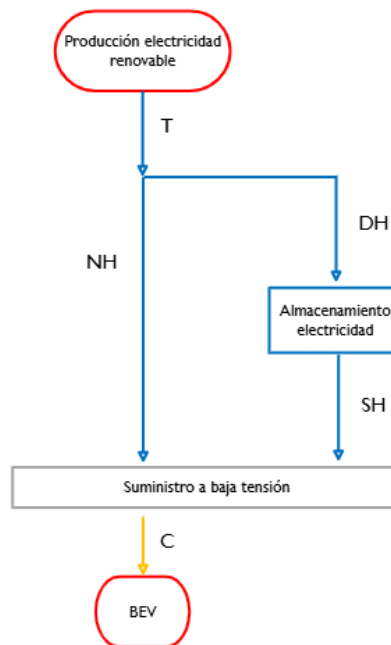


Figura 32. Diagrama de flujo energético del proceso de conducción de un BEV. Fuente: elaboración propia.

Tabla 35. Consumos en el proceso de conducción de un BEV. Fuente: elaboración propia.

Sigla	Significado	Consumo actual	Optimización vehículo	Fuente
C	Consumo eléctrico para mover el vehículo (kWhe/km)	0,151	0,123	FEV [34]
SH	Consumo eléctrico en el suministro de baja tensión de la electricidad almacenada (kWh/km)	0,053	0,043	CNMC [107]
NH	Consumo eléctrico en el suministro de baja tensión de la electricidad no almacenada (kWh/km)	0,124	0,101	CNMC [107]
DH	Consumo eléctrico en el almacenamiento de electricidad (kWh/km)	0,067	0,054	EIA [111] CNMC [107] Suposición propia
T	Consumo global de electricidad renovable (kWhe/km)	0,191	0,155	CNMC [107]

Para esta alternativa, se plantea la hipótesis de que si el sistema eléctrico fuera 100% renovable, se necesitaría un sistema de almacenamiento de respaldo para poder gestionar la generación intermitente de energía. En este ejemplo, se ha supuesto que la generación eléctrica 100% renovable requiere de un sistema de almacenamiento (batería + bombeo). Se considera que el 30% de la energía suministrada al punto de carga se almacena, con una eficiencia de almacenamiento (A) del 81%, según datos de la U.S. Energy Information Administration (EIA) [111]. No se asumen diferencias en una situación futura con eficiencias.

En un BEV, el suministro eléctrico desde la red suele producirse a baja tensión, sobre todo en cargas domiciliarias o públicas convencionales. En cambio, la batería de almacenamiento opera a tensiones más elevadas, por lo que en esta parte habría que tener en cuenta las pérdidas en el suministro de alta tensión.

El consumo global de electricidad renovable se calcularía como la suma del consumo eléctrico en el almacenamiento de electricidad (DH) y el del suministro de baja tensión de la electricidad no almacenada (NH).

$$DH = A.T.* A * 0,3 * B.T.* C \quad (3)$$

$$NH = B.T.* 0,7 * C \quad (4)$$

$$T = DH + NH \quad (5)$$

Como se pudo ver en la *Tabla 35*, la producción de electricidad global por km es de 0,191 kWhe en el escenario actual, y de 0,155 en el optimizado; muy inferior al caso del HEV con la e-Gasolina, pero algo superior al caso ICEV con HVO.

A continuación, se adjunta una tabla donde se puede visualizar la diferencia entre las 3 rutas consideradas, para el escenario actual, el futuro mejorando la eficiencia del proceso, y el futuro mejorando a la vez la eficiencia del vehículo y del proceso.

Tabla 36. Consumo energético de las 3 alternativas y escenarios considerados (kWh/km). Fuente: elaboración propia.

Alternativa	Actual	Optimización proceso	Optimización vehículo + proceso
ICEV – Diesel bio	0,009	0,090	0,062
HEV – e-Gasolina	1,315	1,066	0,730
BEV	0,191	0,191	0,155

También se incluye una gráfica que muestra la comparativa del HEV con e-fuel y el ICEV con HVO respecto al BEV, incluyendo la relación relativa entre ellos:

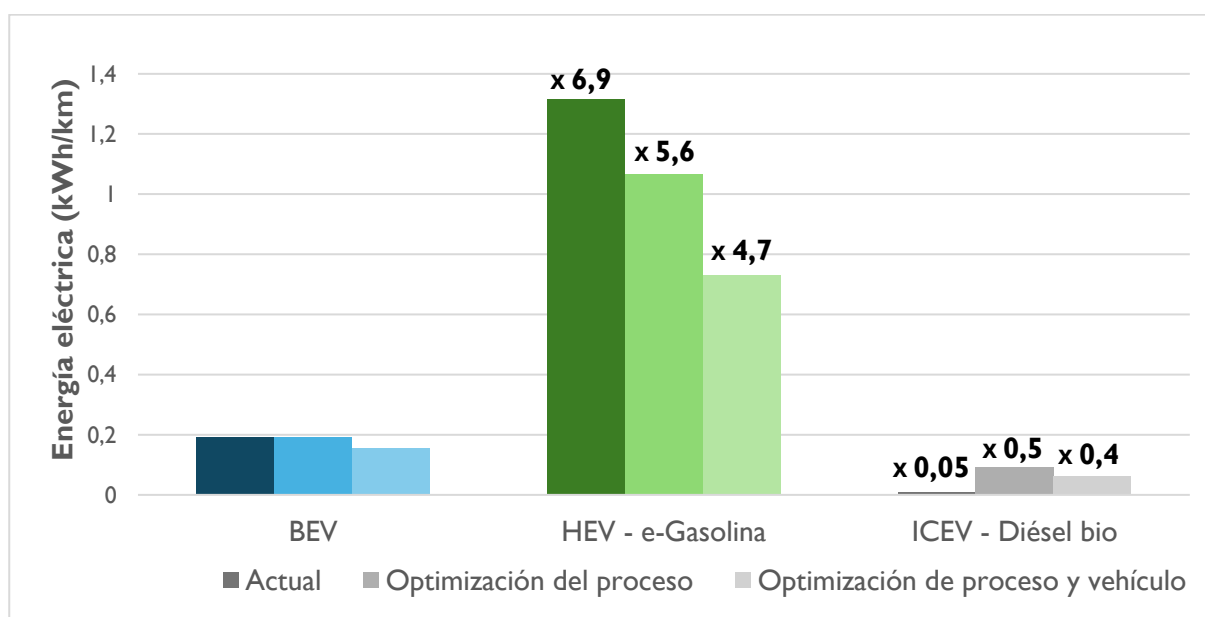


Figura 33. Comparativa de la eficiencia en el uso de la energía eléctrica para BEV, HEV con e-fuel e ICEV con Diésel bio. Fuente: elaboración propia.



Se puede observar que, en términos de consumo eléctrico, el vehículo eléctrico consume hasta 5 veces menos de electricidad que el HEV con e-fuel, incluso en escenarios futuros con mejora de las eficiencias de proceso y vehículo. En cambio, en todos los casos, la ruta del ICEV con HVO muestra mejores resultados que el BEV, ya que prácticamente no depende de electricidad para su producción y operación.

La alta eficiencia del vehículo eléctrico se refleja principalmente en el consumo inicial del vehículo (“C” en los diagramas, según los datos del IDAE), mientras que la mayor parte del consumo eléctrico en el caso de los e-fuels se concentra en la producción de hidrógeno. Estos resultados muestran que la producción de combustibles renovables presenta una variabilidad elevada en términos de eficiencia eléctrica: los combustibles sintéticos requieren grandes cantidades de electricidad, mientras que el HVO apenas depende de ella, ya que la necesidad de hidrógeno es mucho menor y el consumo eléctrico se limita principalmente a los sistemas auxiliares de la planta.

Para la comparación con los resultados que indicaba T&E [106], sería necesario realizar la conversión de los consumos eléctricos por kilómetro recorrido a porcentaje. La eficiencia en este caso se definiría como el porcentaje de la energía eléctrica de todo el proceso que acaba usando el vehículo para moverse.

Únicamente se va a comparar el resultado para el vehículo eléctrico. No se incluye el HEV en la comparación, dado que, con la métrica utilizada en el análisis de este trabajo, la energía final del vehículo (0,495 kWh/km, convertida a unidades energéticas a partir de los 5,55 L/100 km de partida) incluiría una parte importante de energía térmica proveniente del combustible, lo que impediría una comparación directa y coherente en términos de eficiencia eléctrica.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 37. Comparativa de eficiencia energética eléctrica para vehículo eléctrico. Fuente: T&E [106] y elaboración propia.

Año	Consumo proceso (kWh/km)	Consumo final vehículo (kWh/km)	Eficiencia (datos propios)	Eficiencia (T&E)
2025	0,191	0,151	79%	77%
2035	0,155	0,123	79%	81%



Como se puede observar, los valores de eficiencia para el BEV son muy similares a los que aporta T&E, lo que confirma la consistencia de los resultados y pone de manifiesto que los vehículos eléctricos muestran un gran desempeño en la eficiencia en el uso de la electricidad.

Conclusiones

El análisis realizado muestra claramente que los vehículos eléctricos presentan un desempeño muy superior en términos de eficiencia en el uso de electricidad renovable frente a las alternativas de combustión interna con e-fuels. Incluso considerando escenarios futuros con mejoras en los procesos de producción y en la eficiencia del vehículo, los HEV con e-fuel requieren hasta cinco veces más de electricidad por kilómetro recorrido que un BEV, lo que evidencia la intensidad energética de estas rutas y las limitaciones para su escalabilidad en un sistema eléctrico basado en renovables.

Por su parte, la ruta del ICEV con HVO muestra un consumo eléctrico muy bajo, lo que refleja la baja dependencia de electricidad de su producción. Sin embargo, este bajo consumo no implica necesariamente una alta eficiencia energética global, ya que gran parte de la energía puede provenir de fuentes térmicas o internas al propio proceso, fuera del alcance de este estudio centrado en electricidad.

En conjunto, estos resultados refuerzan que, aunque los HEV con e-fuel pueden mejorar en escenarios optimizados, todavía queda un largo camino para que puedan acercarse al desempeño de los BEV en eficiencia en el uso de la energía eléctrica renovable, debiendo abordarse desde el desarrollo tecnológico. Por lo tanto, para que las alternativas con combustibles sintéticos puedan ser una gran opción de descarbonización, es fundamental centrar los esfuerzos en este ámbito.



Uso de materiales escasos

Contexto

La transición hacia una movilidad sostenible y descarbonizada ha incrementado notablemente la demanda de determinados minerales y metales considerados críticos. Estos se definen como aquellos recursos que el gobierno de un país considera indispensables para su economía, sus industrias y su seguridad, que tienen alta demanda y suministro escaso [112]. En el sector del transporte, estos elementos son particularmente relevantes en la fabricación de vehículos eléctricos, al usarse en las baterías, motores eléctricos y sistemas electrónicos, y forman parte del debate público en la Unión Europea, en especial por su elevada dependencia exterior.

La Comisión Europea actualiza periódicamente la lista de materias primas críticas [113], la última vez en 2023, identificando aquellos recursos estratégicos cuya escasez o interrupción en el suministro podría comprometer la competitividad industrial y la seguridad económica del continente. En este contexto, el análisis del uso de materiales críticos en las diferentes etapas del ciclo de vida de los vehículos resulta fundamental para comprender los retos vinculados a la transición energética del sector.

Antecedentes

Diversos informes consultados hasta la fecha, en especial los anuales de la IEA [114], han analizado el uso de materiales críticos en diferentes tecnologías de descarbonización, incluidos los vehículos eléctricos. Otros informes también se han centrado en el impacto de estos materiales en la producción de hidrógeno, como el de Lux [115]. En cambio, no se ha encontrado ningún estudio que analice el impacto de los materiales críticos en los vehículos de combustión con combustible 100% renovable.

Metodología y criterios aplicados

Dada la falta de estudios bibliográficos en la materia de interés en este trabajo, al igual que en la sección de consumo de agua, para esta parte del análisis se cogerá información de un estudio preparado para Repsol por la consultora Sphera Solutions [43], que cuantifica el uso de materiales críticos en vehículos eléctricos e híbridos de gasolina con combustible 100% renovable, cubriendo la etapa de manufactura y uso del vehículo.

Dentro de la etapa de manufactura, los resultados se dividen entre el motor de combustión, el motor eléctrico, la transmisión, el interior y los asientos, el chasis, la electrónica y el sistema eléctrico, la batería, y otros. También se hará una estimación a 2035 para ambos tipos de vehículos, extrapolar los datos que da Sphera para 2025.

Los materiales críticos que cubre el informe son los siguientes, todas ellas presentes en la lista de materiales críticos de la Comisión Europea:

Tabla 38. Materiales críticos y ejemplos de uso. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [43].

Material Crítico	Usos Típicos (ejemplos)
Cobalto	Batería de ion-litio (LIB), catalizadores (por ejemplo, el del Fischer-Tropsch), imanes para motores (AlNiCo)
Litio	LIB
Cobre	LIB, componentes eléctricos, cables, catalizadores (por ejemplo, el del RWGS), generación de electricidad (fotovoltaica / eólica)
Níquel	LIB, aleaciones de acero inoxidable, electrolizador alcalino
Grafito (Natural y sintético)	LIB, electrodos de grafito para electrólisis de aluminio, hornos de arco eléctrico (EAFs)
Silicio (metal)	Semiconductores (en fotovoltaica)
LREEs (Elementos de tierras raras ligeros)	Imanes para motores eléctricos
PGMs (Metales del grupo del platino)	Catalizador de tres vías para el control de emisiones contaminantes, electrolizador (PEM)

Dentro de los LREEs, estarían incluidos el cerio, el lantano, el neodimio, el praseodimio, y el samario. Por otro lado, los PGMs son el iridio, el paladio, el platino, el rodio y el rutenio.

En el caso de la parte de uso del vehículo, para el HEV, se consideran 2 casos: uno con una gasolina fósil, y otro en el que se emplea una e-gasolina producida por la ruta Fischer-Tropsch. Para el BEV, se van a considerar 3 casos: uno en el que el coche se carga con electricidad del mix promedio europeo, otro caso con el mix español, y otro caso con un mix 100% renovable sólo con eólica y solar.

Tabla 39. Alternativas de descarbonización escogidas en el análisis de materiales críticos en ciclo de vida. Fuente: elaboración propia.

	Combustible / Electricidad	Fabricación vehículo	Escenario temporal
HEV – Gasolina	- Combustible convencional - RFNBO (e-gasolina)	Ensamblaje: UE Batería: China	2025, 2035
BEV	- Mix eléctrico UE - Mix eléctrico España - Mix eléctrico 100% renovable (energía eólica y solar)	Ensamblaje: UE Batería: China	2025, 2035

En línea con secciones anteriores, se supone un kilometraje en vida útil de 200.000 km, la batería es una NMC, y los consumos y capacidades de batería son los siguientes:

Tabla 40. Tamaños de batería y consumos energéticos de los vehículos del estudio de materiales críticos. Fuente: elaboración propia.

Alternativa	Tamaño de batería				Consumo energético			
	2025		2035		2025		2035	
	Tamaño [kWh]	Fuente	Tamaño [kWh]	Fuente	Consumo [L/100km ó kWh/100km]	Fuente	Consumo [L/100km ó kWh/100km]	Fuente
HEV-Gasolina	1,5	FEV [34]	2	FEV [34]	5,55	IDAE [33]	3,8	FEV [34]
BEV	63	IDAE [28]	100	FEV [34]	15,1	FEV [34]	12,3	FEV [34]

Con estas modificaciones a 2035, se asume que sólo cambiarán la cantidad de materiales críticos en la parte de manufactura de la batería y en la parte de uso, sin afectación reseñable en otras partes como el chasis o el sistema eléctrico, que en condiciones reales podrían requerir pequeños cambios.

Los resultados del estudio se muestran a continuación.

Presentación y análisis de resultados

Análisis detallado de la fase de fabricación del vehículo

Se empieza por la etapa de fabricación del vehículo, presentando los materiales en grupos de 4 para facilitar la visualización:

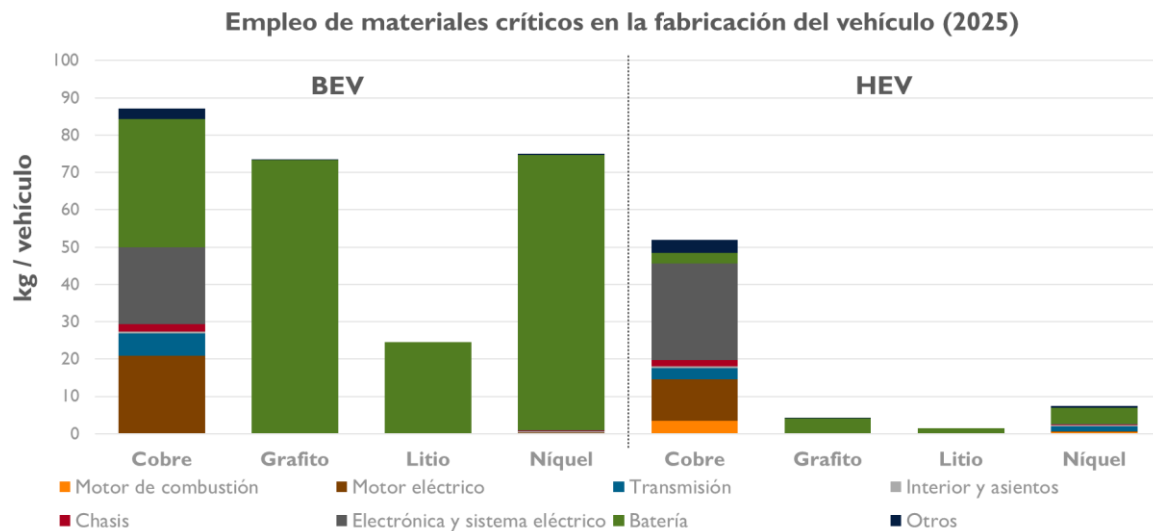


Figura 34. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo (2025). Parte I. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [43].

Se puede observar que el cobre se utiliza en prácticamente todos los componentes del BEV y del HEV. El grafito, el litio y el níquel, en cambio, están presentes principalmente en la batería, lo que le confiere al BEV unos resultados más altos que al HEV.

Para 2035, al aumentar los tamaños de batería, la diferencia entre los BEV y los HEV es aún mayor, siendo en este caso el níquel el material más usado.

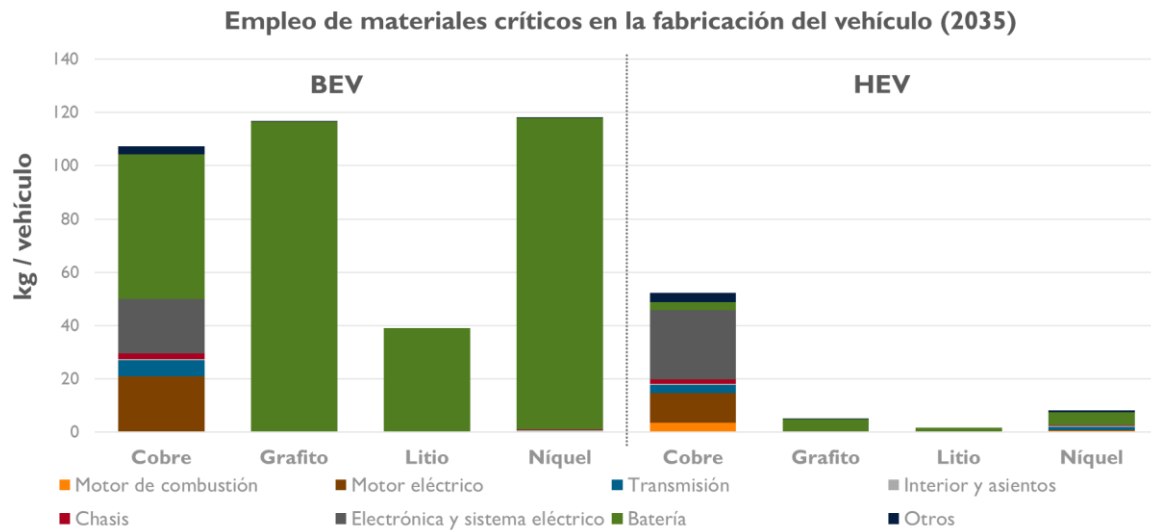


Figura 35. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo (2035). Parte 1. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [38].

Por otro lado, se observan los resultados del cobalto, LREE, PGM y silicio:

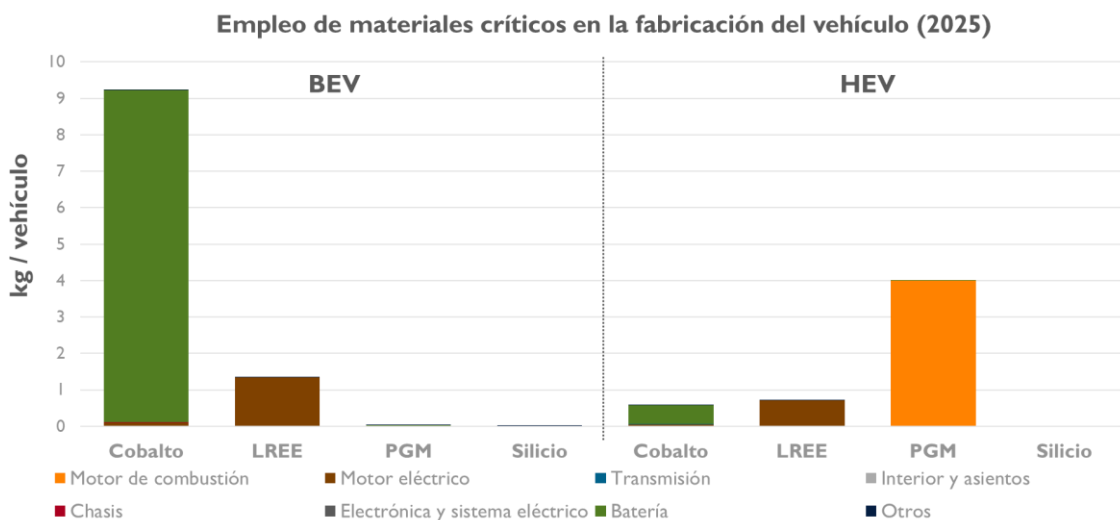


Figura 36. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo (2025). Parte 2. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [43].

El cobalto, al igual que el grafito, el litio y el níquel, se utiliza principalmente en la batería. Los LREE sólo se utilizan en el motor eléctrico, ligeramente mayor en el BEV que en el HEV, mientras que los PGM sólo se utilizan en el catalizador de control de las emisiones contaminantes del tubo de escape, por lo que sólo se utilizan en el HEV. El silicio en este caso tiene un aporte nulo, al sólo contribuir en la parte de generación de energía solar, que se enseñará en el siguiente apartado.

La única diferencia con la imagen del 2035 es el cobalto, que, al aumentarse el tamaño de la batería, pasa de tener un peso de 9kg/vehículo, a tener casi 15 kg:

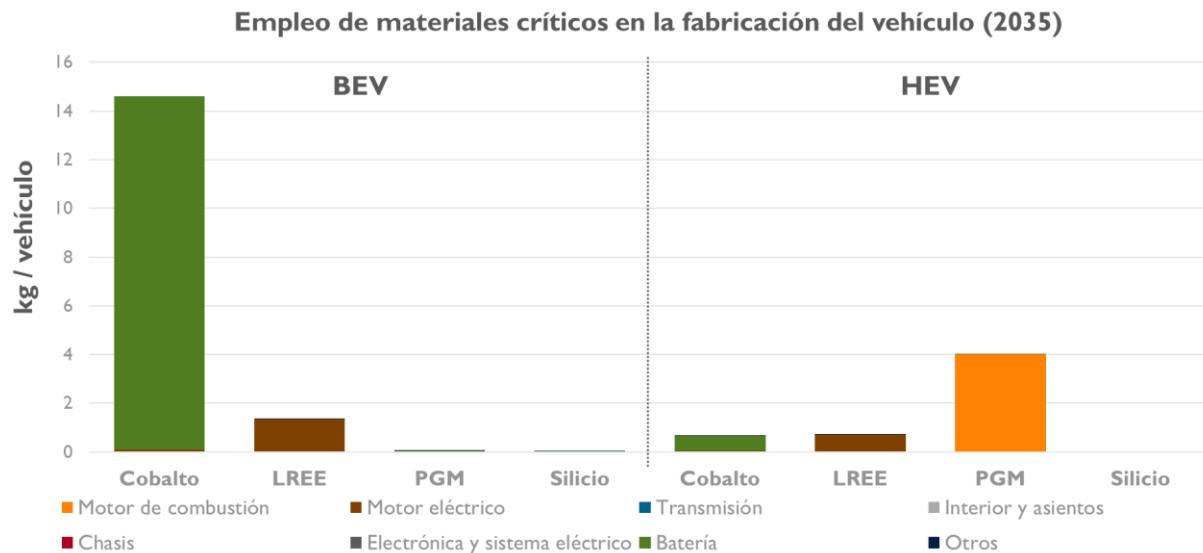


Figura 37. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo (2035). Parte 2. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [38].

Por tanto, se puede observar que, en la parte de fabricación del vehículo, el tamaño de la batería juega un papel decisivo, al estar presente en ella gran parte de los materiales críticos analizados, y de forma reseñable.

Análisis general de las fases de fabricación y uso

A continuación, se presentan los resultados de materiales críticos en la suma de fabricación del vehículo y uso:

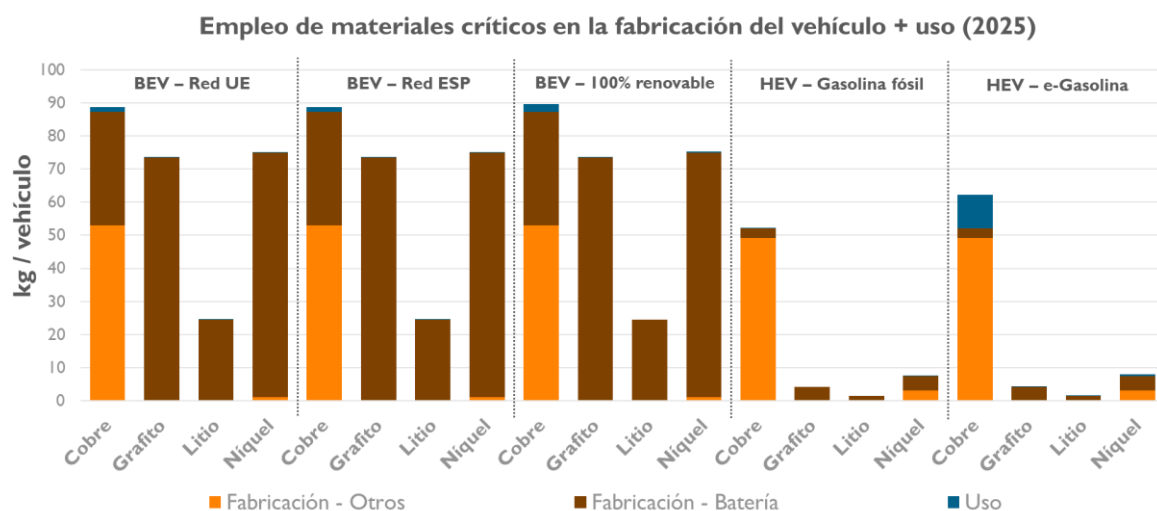


Figura 38. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo y uso (2025). Parte 1. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [43].

Se puede observar que, al añadir la parte de uso, apenas varían los resultados respecto a presentar exclusivamente la parte de fabricación. El único material que se ve afectado en la fase de uso es el cobre, por la parte de generación renovable. Su requerimiento es mayor en el caso de la e-gasolina, ya que para recorrer un kilómetro se necesita más electricidad renovable que en un BEV, tal como se mostró en secciones anteriores. En el caso a 2035, las diferencias reseñables, al igual que se enseñó en figuras anteriores, son el aumento de materiales en la fabricación de batería. La etapa de uso, donde destacaba más el HEV, muestra un resultado inferior a 2025, al disminuir el consumo de combustible por km. No hay cambios en los materiales empleados en la fabricación de otras partes del vehículo.

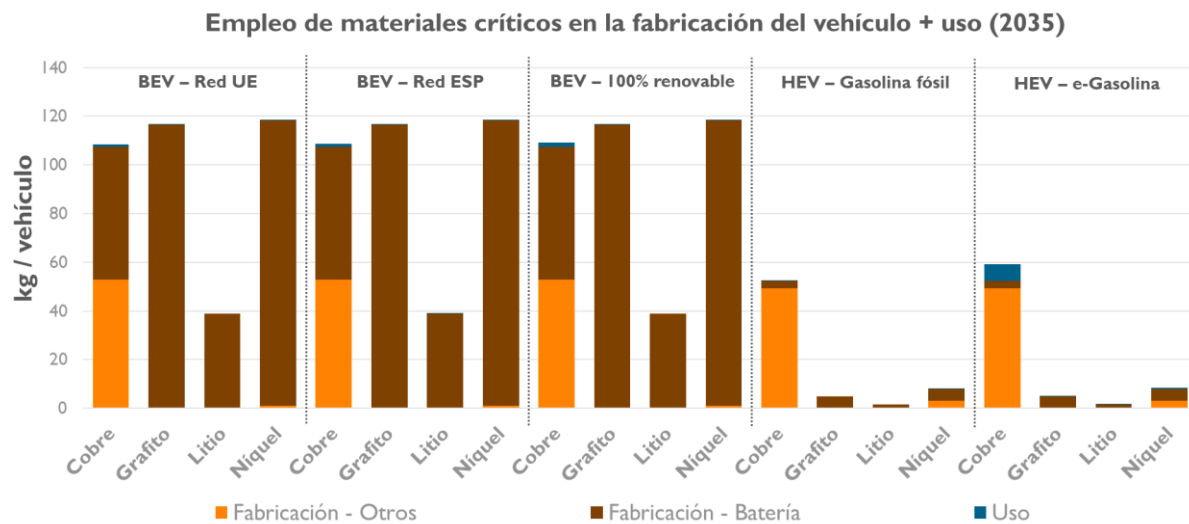


Figura 39. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo y uso (2035). Parte I. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [38].

Analizando la segunda parte de la lista de materiales:

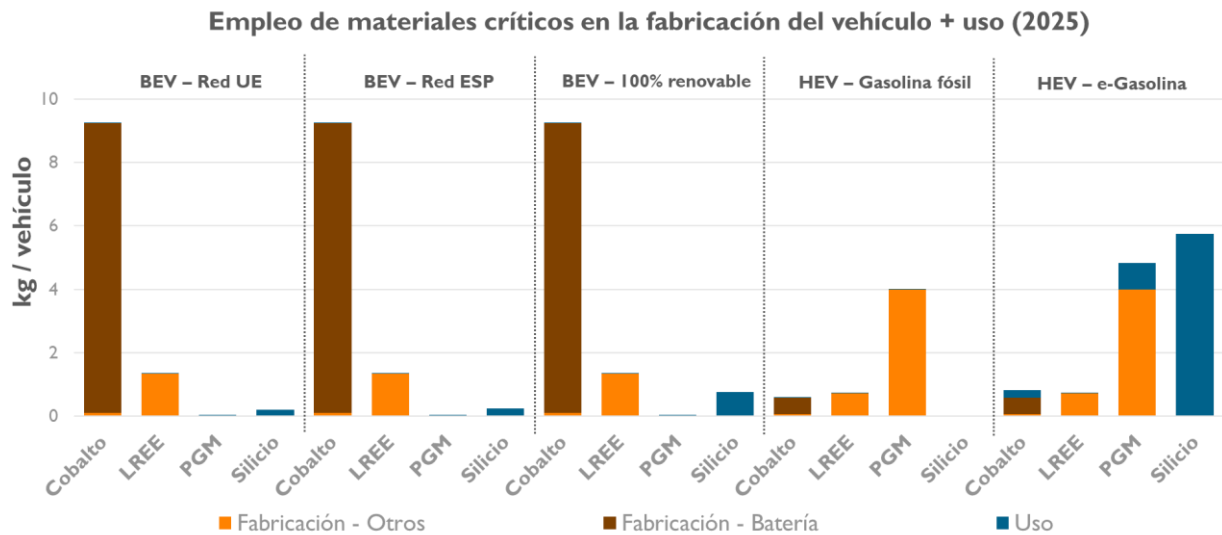


Figura 40. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo y uso (2025). Parte 2. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [43].

Aquí, se visualiza que el silicio toma importancia al estar sólo presente en la generación de electricidad fotovoltaica, en especial en la ruta de los e-fuels, por la misma razón que para el cobre.

Por otro lado, el cobalto que se observa en la parte de uso de la ruta e-fuel es debido al presente en el catalizador de la síntesis de Fischer-Tropsch. Y los PGM, debido al platino usado en la electrólisis con un electrolizador PEM.

Como se enseñó previamente, el cobalto aumenta su presencia en 2035, al subir los tamaños de las baterías. En cambio, al disminuir los consumos, el silicio disminuye considerablemente. En los HEV con e-gasolina, el PGM pasa a ser el material más empleado en vez del silicio.

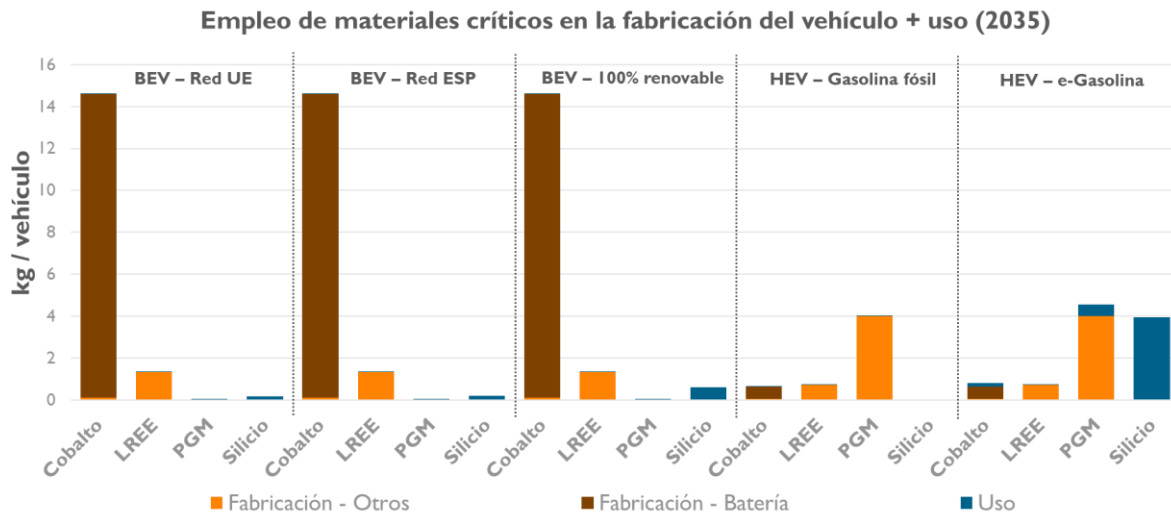


Figura 41. Análisis comparativo de materiales críticos en la fabricación del vehículo y uso (2035). Parte 2. Fuente: elaboración propia a partir de Sphera [38].

Conclusiones

En definitiva, se puede observar que, en los BEV, y también parcialmente en los HEV, aunque en menor medida, la parte de fabricación de la batería y del resto del vehículo juega un papel muy relevante en el empleo de materiales críticos, en especial el litio, el grafito, el níquel, el cobalto, y los LREE, prácticamente sólo presentes en esa etapa.

Por otro lado, materiales como el silicio, los PGM, el cobalto o el cobre pueden desempeñar un papel relevante en la fabricación de energía, especialmente en la producción de combustibles sintéticos. No obstante, su contribución sigue siendo inferior a la de otros materiales críticos empleados en la fabricación de baterías, lo que sitúa a los BEV en una desventaja dentro de este criterio comparativo. Usando gasolina convencional, como se puede ver, los materiales críticos no tienen ningún tipo de papel en la etapa de uso.

Una vez más, como ya se evidenció en las secciones de emisiones de GEI y consumo de agua, se aprecia que el incremento previsto en el tamaño de las baterías a 2035 podría jugar en contra de los vehículos eléctricos al compararlos con los de combustión.

TRL de tecnologías de propulsión y energía

En esta sección, se analizará el nivel de madurez tecnológico (en inglés: Technology Readiness Level, TRL) de las diferentes alternativas.

Como se comentó en la sección de hipótesis y datos de partida, las 3 tecnologías de vehículo que se entran a analizar en el estudio han alcanzado ya el nivel de madurez 9, tanto la ICEV, la HEV y la BEV. Por tanto, lo que se va a analizar en esta sección es el nivel de madurez de las rutas de producción de la energía renovable que se suministra a estos vehículos, es decir, las rutas de producción de combustibles renovables, y las de producción de electricidad renovable.

En cuanto a las rutas de producción de combustibles renovables, destacan:

- **Transesterificación de aceites (TRL 9):** es la ruta convencional de producción de biodiésel (FAME), que se utiliza mezclado con el diésel fósil. Es una tecnología madura implementada a escala comercial. Aunque no se ha planteado como alternativa directa en este estudio (debido a la limitada compatibilidad de los vehículos con el biodiésel puro, como se comentó anteriormente), su uso en mezclas contribuye significativamente al cumplimiento de los objetivos climáticos.
- **Hidrogenación de aceites (TRL 9):** es la ruta de producción de HVO. También es una tecnología madura e implementada a escala comercial, y ya disponible a la venta en numerosas estaciones de servicio en Europa. La principal limitación radicaría en el uso de hidrógeno verde (TRL 8) en lugar de gris (TRL 9) durante el proceso de hidrogenación, lo cual aún no es obligatorio según la normativa. De esta forma se reduciría al mínimo la huella de carbono asociada a la producción del HVO.
- **Metanol a Gasolina (TRL 9):** una ruta para producir gasolina renovable, siempre y cuando se parta de metanol renovable. La tecnología, aunque no está ampliamente utilizada comercialmente, ya está ampliamente desarrollada, en especial la de lecho fijo, con tecnologías licenciadas como la de Exxon Mobil [116], desde los años 70.
- **Etanol a Gasolina (TRL 8):** otra ruta para producir gasolina renovable, pero algo menos desarrollada que la de metanol a gasolina. Los licenciantes industriales son más limitados y la tecnología lleva menos tiempo de experiencia comercial en el mercado.
- **Digestión anaerobia (TRL 9):** tecnología para producir biogás, completamente madura e implementada a escala comercial. Tras un proceso de purificación, se obtendría biometano, que se puede licuar para producir GNL (Gas Natural Licuado), y utilizarse en vehículos de GNL. No obstante, por su menor presencia en el mercado, no se han abordado en este trabajo.



- **Fermentación de azúcares (TRL 9):** es la ruta de producción de etanol. Al igual que con el biodiésel, no se contempla como alternativa en este estudio debido a la incompatibilidad de los vehículos del parque con etanol al 100%, pero al usarse en mezcla con gasolina fósil contribuye a los objetivos climáticos. Es una tecnología también madura e implementada a escala comercial para azúcares de cultivos convencionales, y para residuos ya están en marcha las primeras plantas industriales [26].
- **Gasificación + Fischer-Tropsch (TRL 7-8):** una ruta interesante e incipiente para el tratamiento de biomasa sólida, como los RSU, pero aún en fase de demostración. Hubo una planta, la Sierra, de Fulcrum Energy, en Nevada (EEUU), que empezó a operar en 2022, pero apenas 2 años después se declaró en bancarrota por problemas técnicos y de fiabilidad [117].
- **Ruta convencional de producción de e-fuels (TRL 7-8):** esta ruta se encuentra aún en fase de demostración y escalado industrial, y es especialmente relevante conseguir un avance importante de esta tecnología y una reducción de los costes, al ser una ruta con una materia prima potencialmente ilimitada, y que puede complementar a las rutas bio para cumplir los objetivos climáticos a 2050. Un ejemplo de esto es la planta de producción de demostración de e-fuels que Repsol está poniendo en marcha en Bilbao [118].

Por otro lado, entre las tecnologías de producción de electricidad renovable, se pueden destacar las siguientes:

- **Energía eólica:** es la energía que aprovecha la energía del viento para generar el movimiento de las aspas de un aerogenerador. Es intermitente, al funcionar sólo cuando sopla el viento. En 2024, según ENSTO-E [38], un 18,29% de la electricidad promedio de la UE tuvo su origen en esta fuente.
- **Energía hidráulica:** es la energía que aprovecha el movimiento del agua al caer en el interior de una presa. A diferencia de la energía eólica, se trata de una fuente de generación relativamente estable, siempre que la planta esté instalada y exista suficiente disponibilidad de agua, lo que permite producir electricidad cuando se requiera.. Además, ofrece gran flexibilidad operativa, pues basta con abrir las compuertas del embalse para dejar fluir el agua, lo que permite iniciar o detener la producción de manera inmediata [119]. Esta energía supuso un 13% de toda la electricidad de la UE en 2024 [38].
- **Energía solar:** dentro de la solar destaca la fotovoltaica, que funciona gracias al impacto de fotones de la luz en los paneles, y la térmica, que aprovecha el calor del sol. Esta energía, al igual que la eólica, es intermitente, al depender directamente de la radiación solar. Un 9,38% de la electricidad promedio de la UE en 2024 se produjo a partir de energía solar, un dato muy bajo en comparación con el 20% en España [38].



- **Energía de la biomasa:** en este caso, se produce calor a partir de la quema de materia orgánica vegetal o animal, que luego produce electricidad en una turbina. En Europa contribuyó apenas a un 2,89% de toda la electricidad [38]. También es una fuente de energía flexible.
- **Otras fuentes:** aquí destaca la energía geotérmica, que es la energía que aprovecha el calor o vapor de agua obtenido directamente del subsuelo, y es también una fuente firme de alta flexibilidad. Y también otras energías maduras pero menos desplegadas como la mareomotriz o la eólica marina. Entre todas estas fuentes contribuyen apenas a un 0,39% de la generación eléctrica europea [38].

Todas estas tecnologías llevan produciendo electricidad durante décadas en muchos países del mundo, por lo que han alcanzado un nivel de madurez tecnológica plenamente consolidado (TRL 9).

Con todos estos números, un 43,96% de la electricidad promedio de la UE vino a partir de energía renovable, siendo el % restante principalmente completado por la nuclear (25%), gas natural (13%), y carbón (11%). De ese 43,96%, apenas el 16% lo conforman energías firmes que se pueden utilizar a cualquier hora del día. Por lo tanto, no sólo es necesario un mayor despliegue de renovables por Europa para aumentar el % de contribución renovable al mix, sino también un gran avance tecnológico en **sistemas de almacenamiento energético como, por ejemplo, baterías**, que permitan aprovechar la producción intermitente de la solar y la eólica, para cubrir la demanda en momentos sin generación, como de noche. Otra medida interesante a implementar es el impulso de las plantas de **hibridación solar-eólica**, que ofrecen una producción más estable al complementar ambos recursos y reducir los periodos sin aporte al sistema.

Aunque ambas tecnologías también han llegado a un nivel completo de madurez, se necesita un despliegue mucho más amplio en los próximos años. Europa ya tiene instalados 61 GW de plantas BESS (Battery Energy Storage Systems) a finales de 2024, pero las expectativas son de necesidad de llegar a 400 GW para 2030, según un estudio de SolarPower Europe [120]. El despliegue de plantas híbridas va en cambio más lento, con sólo 1,2 GW instalados en Europa a finales de 2023 [121].

Otra tecnología que debería también avanzar en las próximas décadas son las tecnologías Power-to-X, que permiten almacenar electricidad en forma de un vector energético (hidrógeno, metano, combustibles líquidos, etc.), que luego puede reconvertirse en electricidad (Power-to-Power). Esto abriría la posibilidad de contar con almacenamiento de larga duración (días a semanas), complementando el almacenamiento en baterías, de pocas horas (1-4h). No obstante, aunque varias piezas de la cadena ya alcanzan el TRL 9 (como la tecnología de electrolizadores alcalinos), el sistema completo aún se sitúa en un TRL 7-8, con costes altos y un mercado aún incipiente.



En definitiva, aunque las tecnologías de propulsión (ICEV, HEV, BEV) ya están ampliamente desarrolladas, sigue existiendo un cuello de botella en la producción y gestión de la energía renovable necesaria para alimentar estos vehículos. En el caso de los combustibles renovables, las rutas para producir diésel bio como HVO ya están desarrolladas, pero las rutas de producción de gasolina renovable aún necesitan de un mayor despliegue. También los combustibles sintéticos (e-fuels) requieren un fuerte avance tecnológico y de reducción de costes, y previsiblemente jugarán un papel complementario a los biocombustibles en el horizonte 2030–2040, como se ha comentado. En el ámbito eléctrico, el reto se sitúa en el respaldo de almacenamiento de energía necesario de las tecnologías de generación intermitentes (solar y eólica), llamadas a dominar el mix eléctrico en las próximas décadas. Las baterías (BESS) ofrecen ya soluciones a escala de horas y están en pleno despliegue, mientras que las tecnologías Power-to-X permitirán en el futuro cubrir necesidades de almacenamiento de mayor duración. Por tanto, alcanzar un suministro firme y 100% renovable para los vehículos eléctricos no dependerá sólo de la madurez tecnológica, sino también del ritmo de despliegue y de los marcos regulatorios y de inversión que acompañen a estas tecnologías.

Comodidad de uso para el usuario final

En este apartado, se analizará la comodidad del uso en el usuario final de ambas alternativas, desde 2 ámbitos: autonomía y tiempo de recarga. En este contexto, el vehículo eléctrico históricamente ha mostrado una mayor limitación en comparación con el ICEV y el HEV, al tener autonomías menores y tiempos de recarga mayores. El ICEV suele rondar entre los 600-800km de autonomía, mientras que con el HEV es algo mayor, pudiendo llegar hasta los 1000km [122]. En cambio, la autonomía de un BEV en promedio es de 450 km, variando según la capacidad de la batería.

En cuanto al tiempo de recarga, en los ICEV y los HEV es de apenas unos minutos, al repostar combustible en las estaciones de servicio convencionales, sin variación de tiempo si el combustible que se está suministrando es renovable. Los BEV en cambio tienen un tiempo de recarga mayor y variable, de los 30 min si la carga es rápida a las 10h en recarga doméstica de baja potencia [123].

Un informe de McKinsey & Company [83] de 2025 revela que la preocupación principal de los consumidores es la autonomía, y que el mínimo rango “aceptable” para considerar un BEV ha subido a 500km, respecto a los 425km que aceptaban los encuestados en 2022. Los consumidores en definitiva valoran más la autonomía que el tiempo de recarga, estando dispuestos a pagar casi el doble por tener más kilómetros que por recargas más rápidas.

Entre los encuestados que aún no disponen de un coche eléctrico, un 43% de los encuestados apuntan a la mejora de la autonomía como factor decisivo a la hora de considerar comprarse uno, un 35% apunta hacia conseguir unos precios de compra más bajos que uno de combustión, un 29% a que la disponibilidad de puntos de recarga sea equivalente al de gasolineras, y un 24% a la mejora en el tiempo de recarga [83]. Esto de nuevo revela que el precio de compra es un factor muy decisivo a la hora de comprarse un coche eléctrico, pese a que el coste en vida útil es muy similar o incluso ligeramente inferior al de un coche HEV, como se vio en la parte de TCO; probablemente debido al desconocimiento del consumidor sobre los costes reales de uso.

Este informe revela además resultados interesantes sobre las preferencias de la población respecto al tipo de vehículo que planean comprar próximamente. Los resultados muestran variaciones significativas según la región: en China, los encuestados tienden a preferir un BEV como su próximo vehículo; en Estados Unidos, predominan los que optan por un ICEV; mientras que en Europa se observa una mayor diversidad de preferencias. Un número reseñable de encuestados en todas las regiones, además, muestran preferencia por un PHEV:

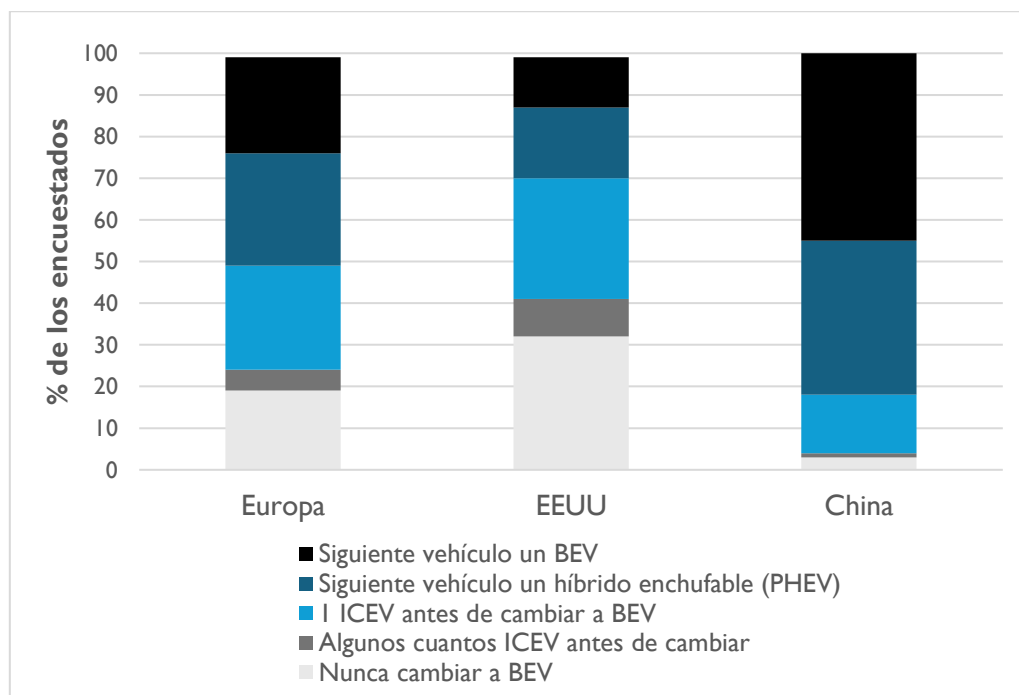


Figura 42. Preferencia del tipo de vehículo en la próxima adquisición. Fuente: elaboración propia a partir del informe de McKinsey & Company [83].

Es relevante observar que el artículo no menciona directamente a los HEV, especialmente considerando que ya son la segunda categoría de vehículo más relevante en ventas, como se pudo ver en la *Figura 6*. Es posible que los HEV estén implícitamente agrupados dentro de la categoría general de ICEV. Esto puede deberse a que los HEV no requieren infraestructura de carga externa y, por tanto, no se consideran parte del núcleo de la transición eléctrica que el artículo de McKinsey analiza, centrada en BEV y PHEV.

Velocidad de implantación

A continuación, se analizará brevemente la velocidad del despliegue de la alternativa de los biocombustibles, la de los e-fuels, y la de la electricidad, antes de entrar a comentar la infraestructura de suministro y la hoja de ruta futura:

- **Biocombustibles:** el **despliegue es rápido**, al no necesitarse cambios en la flota existente de vehículos con tecnología de propulsión ICEV, HEV, PHEV y REEV, y tampoco en la infraestructura logística para combustibles. Se requiere avanzar en el desarrollo tecnológico de la producción de hidrógeno renovable, así como en las plataformas biológicas, termoquímicas y lipídicas, dependiendo de la materia prima utilizada y del proceso aplicado. Por tanto, el único cuello de botella sería la producción de energía.
- **E-fuels:** al igual que en los biocombustibles, no se necesitan cambios en la flota de vehículos ni en la infraestructura logística. No obstante, el **despliegue es algo más lento que los biocombustibles**, el necesitarse un proceso decreciente de la curva de coste de los e-fuels y un mayor desarrollo de la tecnología. Aquí, el avance del desarrollo tecnológico se centra en la producción de hidrógeno renovable, la captura de carbono y los procesos de síntesis de los e-fuels.
- **Electricidad:** el **despliegue es más complejo y lento** debido a la renovación de la flota y a la necesidad de una infraestructura de carga ultrarrápida para permitir trayectos de larga distancia. Desde un punto de vista técnico, se requiere avanzar en electrónica de potencia, en sistemas de gestión de energía avanzados, y en el despliegue de baterías. Por tanto, en este caso, en las 3 etapas de suministro habría cuellos de botella: en la producción de energía, en la red de distribución y en la flota de vehículos.

En 2025, la cuota de mercado de los vehículos eléctricos en Europa ya era del 17%, con mayor desarrollo en algunos países que en otros. Por ejemplo, Noruega lidera con una cuota ya del 94%, seguido de Dinamarca con un 63%. En España es aún del 8%, mientras Francia y Alemania están en un 18%:

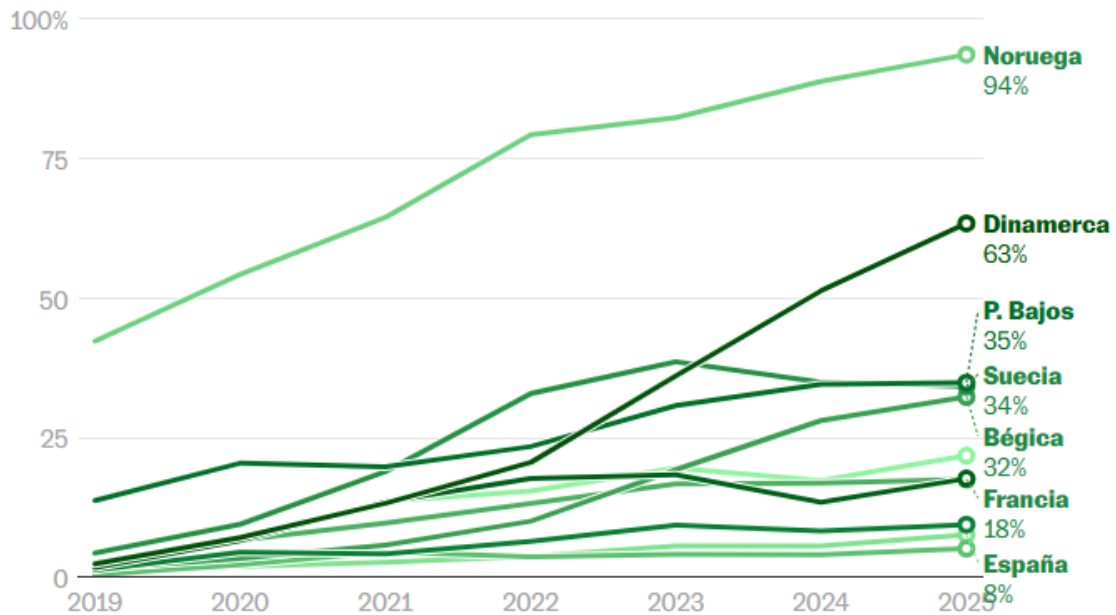


Figura 43. Cuota de mercado de los BEV respecto al total de nuevas matriculaciones en Europa. Fuente: El País [84], a partir del último informe del ICCT [41].

Otro aspecto importante es el de la renovación de la flota de vehículos, clave en la reducción de emisiones del sector, independientemente de que el vehículo por el que se sustituye sea eléctrico o de combustión. Cuanto más antiguo es un vehículo, en general, sus emisiones de GEI y de contaminantes son mayores, como se comentó en secciones anteriores. Según ACEA [22], la edad media de los vehículos ligeros en la UE ha aumentado en los últimos años, de los 12 años en 2021 a los 12,5 en 2023. Este envejecimiento del parque móvil sugiere que la transición hacia una movilidad más con menores emisiones de GEI será un proceso gradual, condicionado en parte por la incertidumbre que genera la revisión del reglamento de emisiones de CO₂ a 2035, la cual está influyendo en la decisión de compra de los consumidores en los últimos años.

Según la IEA [124], para alcanzar la meta de emisiones netas cero en 2050, para 2030, las ventas de vehículos eléctricos en Europa deberían de representar alrededor del 60% del total, incluyendo en este 60% a los **BEV**, **PHEV** y **REEV**, que actualmente solo suman el 20,7% y en los últimos 3 años sólo han subido un 2,7%. Por lo tanto, el objetivo previsto resulta muy difícil. En estas estimaciones, en principio, sí se considera el papel de los combustibles renovables, pero con un papel secundario. No obstante, es un escenario proyectado en el supuesto caso de que no se vendan más coches nuevos con motor de combustión interna a partir de 2035.



En consecuencia, nos encontramos en un panorama energético en el que la normativa, de momento, prioriza la electrificación por encima de los combustibles renovables, pero la realidad del mercado de ventas de vehículos ligeros no parece avanzar al mismo ritmo. De hecho, la tipología de vehículo cuyas ventas más aumentan es la HEV, cuya regulación a partir de 2035 está aún pendiente en la revisión de la normativa de vehículos ligeros prevista para 2026.

Ante la ralentización de las ventas de vehículos eléctricos durante el último año, algunas marcas han empezado a replantearse sus estrategias, al no alcanzar el ritmo de comercialización previsto. Esto ha llevado a que varios fabricantes europeos retrasen sus objetivos de electrificación y vuelvan a invertir en mejoras de sus modelos de combustión [125].

Los líderes de la industria automovilística europea están abogando por un enfoque más pragmático, que flexibilice los objetivos de reducción de CO₂, reconociendo que los vehículos eléctricos de batería liderarán la transición, pero insistiendo en salvaguardar la neutralidad tecnológica, que permita mantener todas las opciones clave para cubrir las necesidades del transporte, entre ellas los combustibles renovables [125]. Por ello, la revisión en 2026 del Reglamento de CO₂ para vehículos ligeros resultará especialmente relevante para el sector.

Infraestructura de suministro al usuario final

Puntos de recarga vehículo eléctrico

En cuanto al despliegue de puntos de recarga para vehículo eléctrico, según los datos más recientes, Europa está cerca de llegar al millón de puntos públicos de recarga, habiendo pasado en junio de 2025 los 950.000 puntos [126], destacando Países Bajos, Alemania y Francia, que entre los 3 países concentran la mitad de toda la infraestructura europea [127]. Según la IEA [128], ya hay más de 6 millones de coches eléctricos circulando por Europa, lo que corresponde a unos 8,5 vehículos por punto de recarga público.

La instalación de estos puntos de recarga se espera que siga aumentando con fuerza en la UE debido a la adopción del Reglamento de Infraestructura para Combustibles Alternativos [129], que entró en vigor en abril de 2024 y que forma parte del paquete Fit For 55. Este exige la instalación de un punto de recarga de al menos 150kW a cada 60 km, en las principales carreteras europeas [128], a más tardar el 31 de diciembre de 2025, y dos puntos de recarga antes del 31 de diciembre de 2027.

Esta era la imagen europea a 2023:

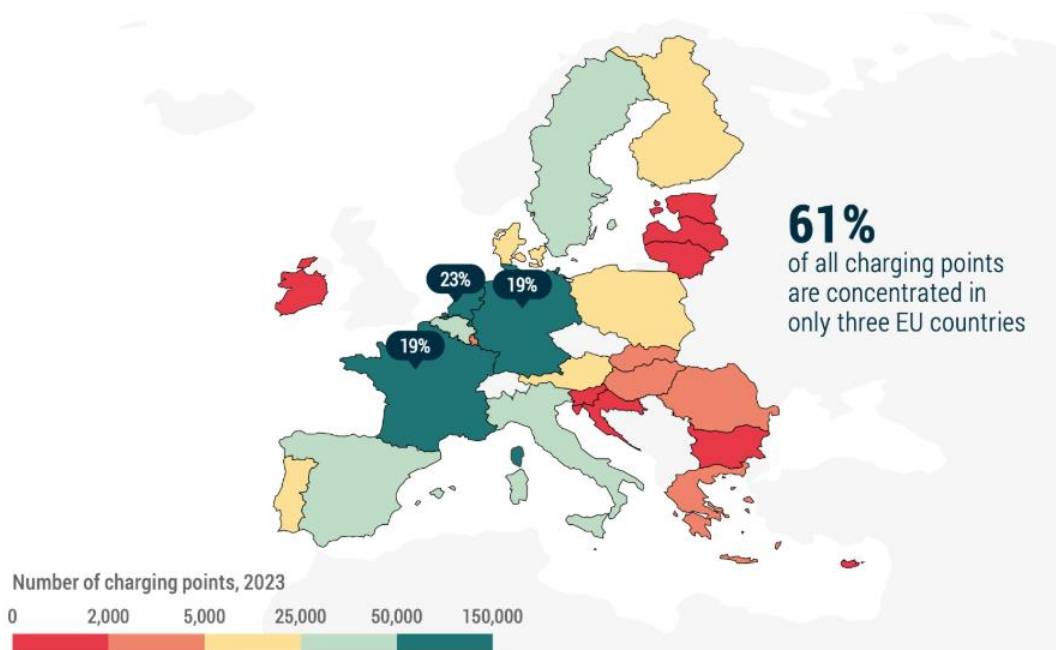


Figura 44. Puestos de recarga de vehículos eléctricos por país, a finales de 2023. Fuente: EAFO [130].

En España, hay ya unos 50.000 puntos de recarga, según AEDIVE [131]. En el artículo no especifica si están todos los puntos en funcionamiento o alguno está pendiente de autorización o instalación. Es probable que se refiera a puntos registrados como activos en la red pública, aunque no necesariamente estén todos operativos al 100%.

Esto correspondería a 5,4 vehículos eléctricos por cada punto de recarga [132], mejor que la media europea, pero debido al menor despliegue en comparación con otros países. En abril de 2025, el Gobierno español puso en marcha Reve, el primer mapa oficial de puntos públicos de recarga españoles que ofrece información práctica de los mismos en tiempo real. Esta página web, en breve también en formato app, ofrece además información del precio de la electricidad en el punto, si el conector está libre u ocupado, y su potencia, con el fin de que el consumidor pueda calcular cuánto tiempo necesita cargar su vehículo en ese punto [133]. La Unión Europea, por otro lado, en la web EAFO (*European Alternative Fuels Observatory*) [134] ofrece un mapa interactivo con todos los puntos de recarga en Europa, aunque con menor información que lo que ofrece Reve para España. Esta web ofrece también información de los puntos de recarga de GNL, GNC e hidrógeno, pero lamentablemente aún no ofrece información sobre los puntos de recarga de diésel o gasolina renovable.

Los puntos privados (domésticos o de empresa), por otro lado, no se suelen contabilizar en las metas europeas y en los informes, pero comúnmente es donde se realiza la mayoría de las cargas. Según ChangeUp Europe [135], al final de 2024 había unos 7,5 millones de puntos de recarga privados, lo que significa que el 90% de todos los puntos de recarga son privados. Para 2035, la expectativa es que se llegue a 35 millones de puntos de recarga privados, de los cuales 85% serán residenciales [135].

Según la organización Transport & Environment (T&E) [136], los países europeos están cumpliendo con creces las expectativas de crecimiento de puntos de recarga, gracias a los avances de los últimos años. En abril de 2024, cuando se publicó el informe del que se recoge información, tanto la Unión Europea en conjunto como España, Italia, Francia, Alemania y Polonia por separado, ya habían cumplido sus objetivos de 2024, e incluso todos ellos menos Alemania ya habían cumplido también los de 2025. La UE en conjunto se propuso llegar al millón de cargadores para 2025, objetivo que previsiblemente también se cumplirá, al haber superado el pasado junio los 950.000 cargadores y teniendo en cuenta el ritmo de crecimiento de los últimos años:

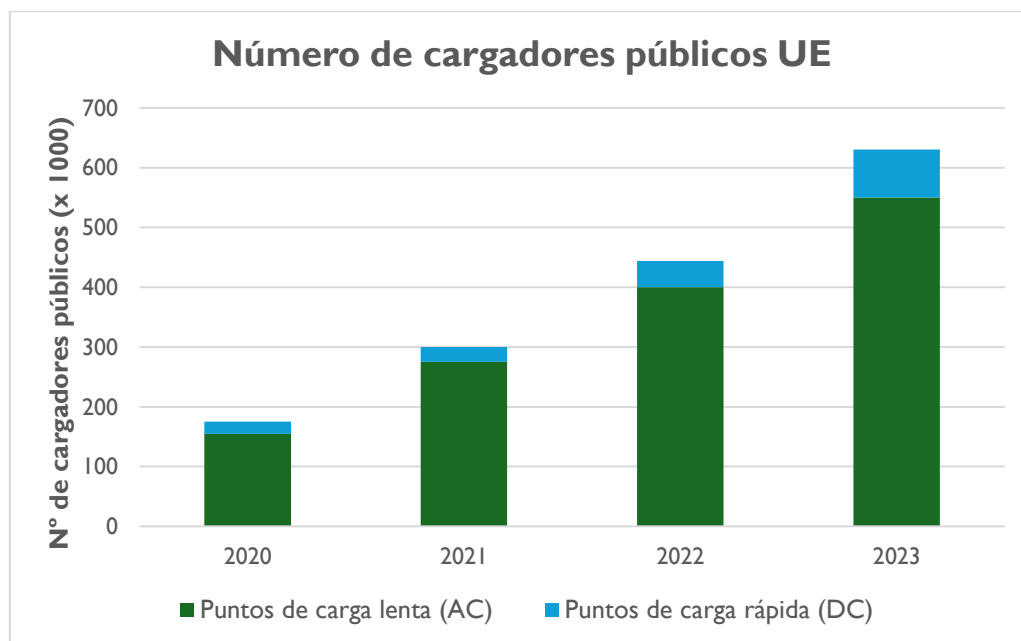


Figura 45. Número de cargadores públicos para vehículos eléctricos en la UE. Fuente: elaboración propia a partir de T&E [136].

España, por otro lado, pese a disponer de menos puntos de recarga que otros países europeos de dimensiones similares, el crecimiento en los últimos años ha sido muy alto, multiplicándose por 10 desde el 2020 hasta ahora. Esta es una imagen del crecimiento en España que aporta el informe de T&E desde 2020 a 2023 (a mediados de 2025, como se comentó previamente, ya estamos en 50.000 puntos de recarga):

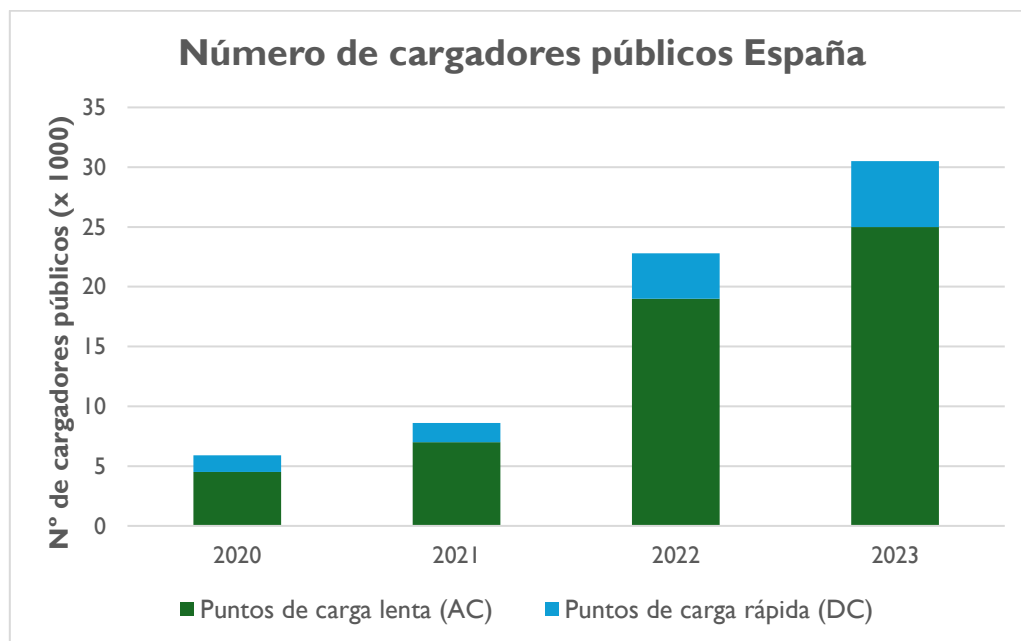


Figura 46. Número de cargadores públicos para vehículos eléctricos en España. Fuente: elaboración propia a partir de T&E [136].

Recientemente, Repsol ha inaugurado en Madrid tres estaciones de servicio para intercambio de baterías para vehículos eléctricos, en colaboración con Stellantis, Free2move y Ample [137]. Este sistema permite reemplazar una batería descargada por otra completamente cargada en apenas cinco minutos, optimizando así la operación de flotas eléctricas en entornos urbanos. Además, la arquitectura modular de la tecnología de Ample facilita un despliegue rápido, ya que este tipo de estaciones pueden instalarse en sólo tres días, lo que permitirá una expansión ágil de esta red.

Anteriormente, el despliegue de la flota de vehículos eléctricos enchufables (BEV+PHEV) en la UE crecía a una velocidad mayor que el despliegue de puntos de recarga, lo que suponía un problema de disponibilidad energética. No obstante, esta tendencia ha cambiado en los últimos años:

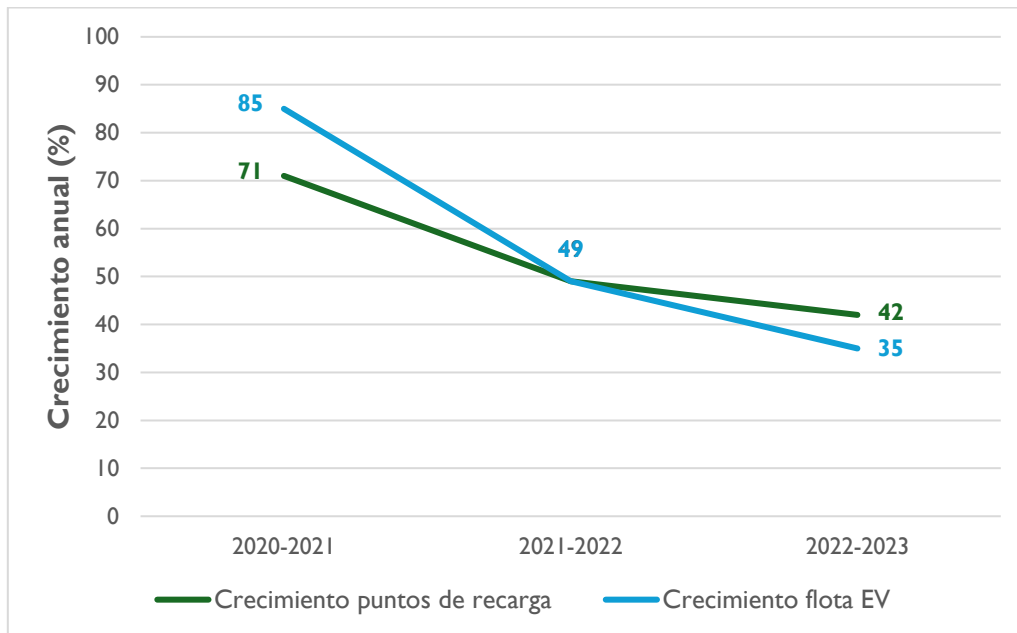


Figura 47. Tendencia de crecimiento flota de vehículos eléctricos enchufables y puntos de recarga en la UE. Fuente: elaboración propia a partir de T&E [136].

Según el último informe de la IEA [128], más actualizado, en 2024 en la UE, en torno al 80% de los cargadores públicos de la UE eran lentos, un 8% rápidos, y un 12% ultrarrápidos, con una capacidad de carga disponible promedio de 4 kW por cada coche eléctrico [84].

En España, por otro lado, a 31 de agosto de 2025, en torno a un 67,7% de los cargadores eran lentos, un 20,8% rápidos, y un 11,5% ultrarrápidos [84], siendo la capacidad de carga algo superior a la media europea.

De todas las autopistas de España, según el mismo informe de la IEA [128], más del 75% de ellas tienen al menos un punto de recarga rápida, de las cuales la mitad tienen un punto ultrarrápido (mayor a 150 kW), algo inferior de la media europea, en donde en general más del 50% de las autopistas están cubiertas por algún cargador ultrarrápido.

En términos de estaciones de servicio por km [128], el número de puntos de recarga rápida por km promedio en las autopistas de Europa es de apenas 1,5 puntos por cada 50 km, habiendo 1 punto por cada 50 km de ultrarrápidos. En comparación, el número de gasolineras es en torno a 5 por cada 50 km, lo que significa que la comodidad de recarga en viajes largos aún está lejos de ser comparable a la de los coches de combustión. Más adelante se realizará la comparativa respecto a las estaciones con combustible 100% renovable.



Para 2030, por otro lado, la Comisión Europea tiene como objetivo llegar a los 3,5 millones de puntos de recarga [130]. Según T&E [136], a este ritmo de crecimiento, la UE alcanzaría los 3 millones de cargadores ya en 2027. No obstante, la Asociación Europea de Constructores de Automóviles (ACEA), considera que este objetivo no es suficiente para cubrir toda la demanda, proyectando una necesidad de 8,8 millones de puntos de recarga públicos [130]. En España, por otro lado, según EAFO, sería necesario llegar a los 340.000 puntos de recarga para 2030, respecto a los 50.000 actuales. En el PNIEC español, no hay un objetivo concreto de puntos de recarga para 2030, pero sí se establece un objetivo de llegar a los 5,5 millones de vehículos eléctricos, incluyendo también a los híbridos enchufables, circulando en España en 2030 (a septiembre de 2025, la cifra es aún inferior al millón) [138].

No se ha encontrado en bibliografía información relativa a los puntos de recarga con electricidad 100% renovable. Algunas compañías como Iberdrola, Ionity, Fastned o EnBW ofrecen esta modalidad en algunas de sus estaciones, pero plataformas como Reve o EAFO [133], no especifican esta característica en sus mapas, lo que dificulta un análisis más exhaustivo.

Estaciones de servicio con combustible 100% renovable

En la actualidad, el despliegue de estaciones de servicio que suministran combustible 100% renovable es mucho menor al de puntos de recarga de vehículo eléctrico. No obstante, su problema no es de infraestructura sino de producción, al ser suministrados en las estaciones de servicio de igual forma que el resto de combustibles convencionales, por lo que no es necesario implementar modificaciones en éstas para suministrar este nuevo tipo de combustible ni crear o construir nuevos puntos de repostaje, ya que la red actual está desplegada con una altísima capilaridad. Además, el tiempo de uso para repostar el combustible es menos intensivo que la recarga eléctrica, por lo que un punto de repostaje de combustibles renovables puede entregar más energía renovable por unidad de tiempo que el de recarga. Eso sí, para suministrar los combustibles renovables, es necesario contar con una logística segregada respecto a los combustibles convencionales.

En Europa, la mayor parte del combustible renovable que ya se vende en las estaciones de servicio es el HVO, compatible con los coches diésel del parque. En cambio, como se comentó anteriormente, el despliegue de gasolina 100% renovable todavía es muy bajo, al no estar aún tan desarrollada su producción. No obstante, el pasado 8 de octubre de 2025, Repsol anunció un despliegue pionero de gasolina 100% renovable en 20 estaciones de servicio de España, con la previsión de llegar a 30 a final de año [17]. Además de estas estaciones, en el resto de Europa sólo hay otra estación que suministra gasolina 100% renovable, en Alemania [32], del grupo Energie Aktiv.



En algunas estaciones de Alemania, además, también se vende gasolina 95% renovable con componentes biogénicos y metanol, compatible con cualquier motor de gasolina moderno [32]. Y también en numerosas estaciones de servicio de Europa se vende gasolina en *blending* con bioetanol de hasta el 85% (E85), con una reducción notoria de las emisiones, pero sólo compatible con los vehículos “flex-fuel” de gasolina.

Desde 2016, cuando se aprobó la venta de HVO puro y su compatibilidad con los vehículos del parque, se ha ido desplegando por estaciones de servicio europeas, empezando por los países nórdicos, siendo la finlandesa Neste la pionera en su producción [139].

Otro de los referentes en la producción de HVO es la italiana Eni, que lleva varios años promoviendo activamente este combustible, ofreciéndolo en sus estaciones de servicio a un precio inferior al convencional [140]. Este país es el líder europeo en número de estaciones de HVO.

En España y Portugal, el despliegue de HVO por las estaciones de servicio comenzó en 2023, y en la actualidad ya hay más de 1.300 estaciones de servicio que suministran este combustible, con expectativas de llegar a 1.500 a finales de 2025. Esto la convierte en el segundo país europeo en disponibilidad de este combustible, sólo por detrás de Italia. La compañía que lo vende en sus estaciones de servicio es Repsol. [30]

Por otro lado, la compañía OnTurtle, una empresa española especializada en servicios energéticos y con presencia en otros países europeos, tiene una red de 71 estaciones de servicio con HVO entre Países Bajos, Austria, Alemania, España, Italia y Bélgica [141].

En la siguiente figura, se puede ver el destacado despliegue de estaciones de servicio que suministran HVO en Europa en los últimos años. Actualmente, ya son 6580 estaciones, según datos actualizados a septiembre de 2025 [32]. Entre todas ellas, Italia es la que más tiene, con unas 2.000, seguida de España, que en la primavera de 2025 ya superó también las 1.000:

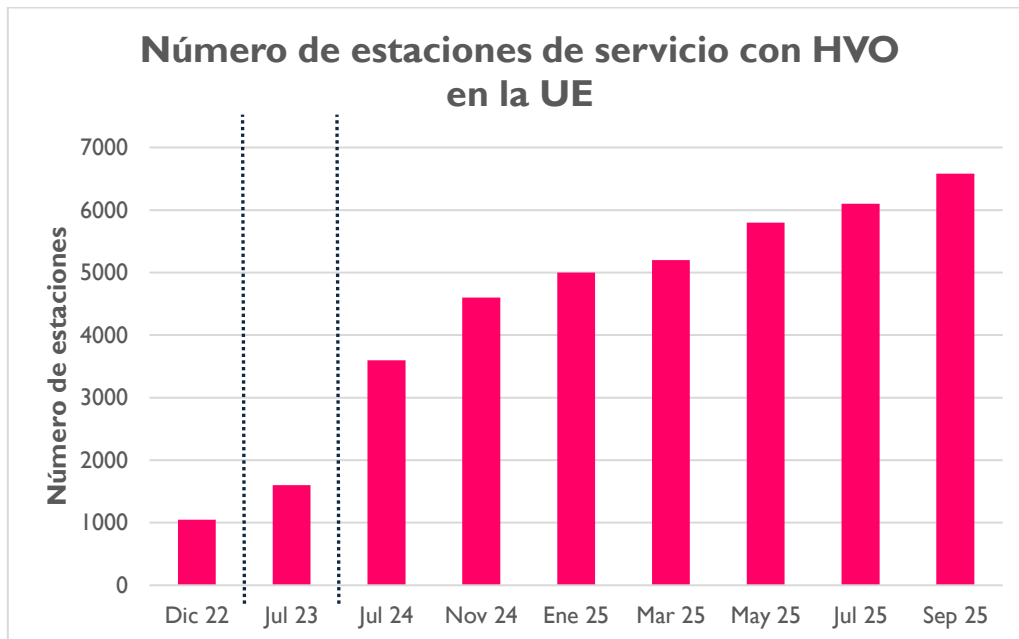


Figura 48. Estaciones de servicio con HVO en la UE. Fuente: elaboración propia a partir de Efuelsnow [32].

Según Argus, las regulaciones más estrictas en el noroeste de Europa podrían impulsar el consumo de HVO a niveles récord en 2026, buscando cumplir los objetivos de la UE de descarbonización [142]. Se indica que la demanda de 2026 en Alemania, que vende HVO en estaciones de servicio desde la primavera de 2023, podría aumentar en 1,5 millones de toneladas, cuadruplicando los niveles de 2025. A finales de 2025, se estima que Alemania llegará a las 2000 estaciones de servicio con HVO [32].

Este análisis comparativo muestra una diferencia clara en el grado de despliegue de los puntos de recarga para vehículos eléctricos frente a las estaciones de servicio con combustible 100% renovable. En Europa, los puntos de recarga ya superan los 950.000 en 2025 y continúan aumentando a gran velocidad gracias a la normativa comunitaria, con la previsión de alcanzar 3,5 millones en 2030. En contraste a esto, la disponibilidad de combustibles líquidos renovables (sobre todo gasolina renovable) es aún reducida, aunque está en expansión, con Italia y España a la cabeza, liderando el número de estaciones de servicio.

Sin embargo, debe subrayarse, como se comentó anteriormente, que la diferencia en despliegue no responde a un problema de infraestructura, sino de producción. Ya que, mientras que el vehículo eléctrico requiere una masiva instalación de puntos nuevos de carga, los combustibles renovables pueden aprovechar la red ya existente de estaciones de servicio, eliminando la barrera de invertir en infraestructura. Por lo que el verdadero cuello de botella está en asegurar un suministro suficiente y segregado para poder ofrecerlos de manera masiva, además de regulación, como se comentará en la próxima sección.



Desde la perspectiva del consumidor, todo esto se traduce en que, hoy en día, los usuarios de vehículos eléctricos disponen de una red mucho más amplia que los conductores de vehículos ICEV o HEV que desean repostar combustible 100% renovable. Esto genera una limitación a corto plazo, pese al potencial de despliegue rápido que pueden llegar a tener estos combustibles.

No obstante, conviene destacar que para que la comparación sea plenamente justa, sería necesario centrarse en los puntos de recarga ultrarrápida, más comparables en tiempo de repostaje respecto al combustible renovable. El número de puntos de recarga rápida por km de autopista, según la IEA [128], apenas era de 1,5 puntos por cada 50 km (1 punto cada 33 km), habiendo sólo 1 punto por cada 50 km de ultrarrápidos. No se ha encontrado ningún informe que especifique el número de estaciones de servicio de HVO por km de autopista, aunque puede realizarse una estimación aproximada sabiendo que existen 6580 estaciones de servicio distribuidas a lo largo de 3 millones de km de carreteras en la UE, de los cuales 84.000 km son autopistas [143]. Esto se traduciría, de forma muy simplificada, en 1 estación cada 455 km de carretera, y 1 cada 12 km de autopista. El cálculo más preciso requeriría conocer la distribución real de las estaciones entre áreas urbanas, interurbanas y autopistas, algo muy complejo de determinar con la información disponible.

Por otro lado, estos números de recarga rápida deberían de segregarse considerando únicamente los puntos de recarga que suministran electricidad 100% renovable, ya que no toda la recarga eléctrica puede considerarse descarbonizada al proceder mayoritariamente de redes eléctricas con un porcentaje relevante de combustibles fósiles en el mix. Sin embargo, a día de hoy no existe información suficiente sobre cuántos puntos de recarga europeos cuentan con certificados de electricidad renovable, dificultando un análisis equitativo en términos de sostenibilidad.

En cualquier caso, considerando la información disponible, podría inferirse que la red de suministro de combustibles 100% renovables presenta una madurez relativamente superior en términos de cobertura y rapidez de repostaje, al menos hasta que la infraestructura de recarga eléctrica 100% renovable alcance un mayor grado de desarrollo.

Consideraciones finales del análisis comparativo

Desde un punto de vista de la hoja de ruta futura, al hablar de descarbonización del transporte por carretera, la Comisión Europea ha desarrollado una regulación que, en la práctica, favorece de manera más directa al vehículo eléctrico que a los combustibles renovables, pese a que en la Directiva de Energías Renovables (RED III [7]), se contemplan ambas opciones dentro de las alternativas a los combustibles fósiles.

Asimismo, como se comentó en la introducción, en sectores como el transporte aéreo y marítimo, la UE sí ha desarrollado normas específicas destinadas a impulsar y regular el uso de combustibles renovables, como el Reglamento ReFuelEU Aviation [18] y el FuelEU Maritime [19], para alcanzar los compromisos climáticos de 2030 y 2050. Esto pone de manifiesto que la falta de impulso regulatorio para transporte por carretera no parece obedecer a un criterio técnico, sino más bien a decisiones políticas o estratégicas, como se irá explicando en detalle a continuación.

Tal y como se comentó anteriormente, el Reglamento de emisiones de CO₂ de vehículo ligero 2023/851 [8] estableció un objetivo de reducción de emisiones en el parque de turismos del 100% para 2035, considerando emisiones de tubo de escape. Con ello, en 2035, todos los vehículos nuevos vendidos en la Unión Europea deberían ser de cero emisiones en tubo de escape, dejando por tanto fuera a los vehículos con motor de combustión con combustible renovable. No obstante, este reglamento acabó incluyendo un considerando para analizar la posibilidad de seguir vendiendo ICEVs que usen “combustibles neutros en carbono”, aunque esta excepción aún no está aprobada, siendo en 2026 cuando está prevista la revisión de este reglamento.

En esta normativa, además, no hay ninguna mención relativa a la obligatoriedad de que la electricidad que se suministra a los vehículos eléctricos sea de origen renovable ni disponga de certificados de sostenibilidad o adicionalidad, como sí sucede con la electricidad requerida para producir el hidrógeno renovable necesario para producirlos e-fuels. Esto permite que no haya ninguna limitación a la recarga de electricidad de redes eléctricas con aún bajas penetraciones de energía renovable, en especial en algunos países de la UE como Polonia, República Checa o Eslovaquia, cuyo mix eléctrico es de momento sólo en torno a un 30% renovable [144].

Por otro lado, el Reglamento 2023/1804 [145] relativo a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos, especifica objetivos de infraestructura de repostaje de vehículos eléctricos, de hidrógeno y de metano licuado en vehículos de carretera, pero no establece objetivos equivalentes para el despliegue de estaciones de servicio que suministren diésel o gasolina 100% renovable.



Esta normativa, como se comentó en la sección de infraestructura de suministro, exige la instalación de un punto de recarga de al menos 150kW a cada 60 km, en las principales carreteras europeas [128], antes del 31 de diciembre de 2025, y dos puntos de recarga antes del 31 de diciembre de 2027.

Por otro lado, en España, respecto a los distintivos ambientales de la DGT [72], como se comentó previamente, no hay de momento ninguna mejora de etiqueta establecida en el caso de que un vehículo ICEV viaje con combustible renovable. De todas formas, tal y como se explicó en la sección de emisiones de contaminantes locales, el empleo de combustible renovable apenas mejora levemente estas emisiones respecto a utilizar combustible fósil.

Este etiquetado genera a veces situaciones curiosas, al anteponer en algunos casos tecnología de vehículo antes que emisiones absolutas, otorgando ventaja a la presencia de sistemas híbridos o eléctricos. Por ejemplo, un MHEV (microhíbrido) Euro 6 de 2015, tendría etiqueta ECO, mientras que un ICEV que se venda en 2025, tendría etiqueta C, cuando previsiblemente sus emisiones por tubo de escape sean menores al MHEV de 2015. Desde el punto de vista de la salud humana y del medio ambiente, que debería ser el criterio prioritario para regular el transporte urbano, la clasificación actual, además de necesitar una actualización que tenga en cuenta la evolución de las normas Euro y sus subetapas (Euro 6c, Euro 6d-temp, Euro 6d, Euro 6e), debería basarse en criterios técnicos correctamente definidos.

Respecto a esto, las asociaciones ecologistas llevan años exigiendo una reforma de este sistema de etiquetado [146], defendiendo que la etiqueta ECO a veces es otorgada a vehículos más contaminantes que los C. Para evitar esto, han lanzado una nueva propuesta de sustitución de la etiqueta ECO por una etiqueta “D”, asignable a HEV, vehículos de gas, y vehículos ICEV con un límite de emisiones de CO₂ menor a 95 g/km. Es razonable pensar que los ICEV que utilicen combustible renovable entrarían en esta categoría, al estar reconocidas sus emisiones reales de CO₂ por tubo de escape como cero netas.



Figura 49. Nueva propuesta de etiquetado de vehículos para el transporte por ciudades. Fuente: El País [146].

No obstante, el CO₂ no afecta directamente a la salud respiratoria de los habitantes de las ciudades ni a la calidad del aire; es decir, no es un contaminante local sino de efecto invernadero. Pese a ello, la inclusión del CO₂ como criterio adicional podría ser una buena idea para incentivar el repostaje de combustible renovable y fomentar un parque de vehículos urbanos menos emisores de GEI.

En línea con esto, el pasado 8 de octubre de 2025, el Congreso español aprobó, tras más de 3 años de tramitación parlamentaria, la nueva Ley de Movilidad Sostenible [147], que, entre otras cosas, revisará y previsiblemente modificará el sistema actual de etiquetado ambiental, tomando como referencia la propuesta de las asociaciones ecologistas mostrada en la Figura 50.

En cualquier caso, como se explicó en la sección dedicada a los contaminantes locales, los vehículos ICEV modernos presentan niveles de emisiones muy por debajo de los umbrales considerados perjudiciales para la salud según las normativas Euro 6 y Euro 7, y, por tanto, ya similares a las de los vehículos electrificados. Esto se cumple independientemente de si utilizan combustibles renovables o no, por lo que podría plantearse el debate sobre la posibilidad de permitir su acceso a las zonas de bajas emisiones, siempre que cumplan dichos estándares.



Otro punto a favor de los coches eléctricos son la ayuda y los incentivos a la compra de estos coches [148]; muchos de los criterios ya fueron introducidos en el apartado de TCO e incluidos en su cálculo. En España, algunos de ellos son las ayudas del Plan Moves III, que pueden alcanzar hasta 7.000€ considerando el achatarramiento de un vehículo antiguo. También los Certificados de Ahorro Energético, que certifican el ahorro de energía que se adquiere al comprar un BEV nuevo y entregar un ICEV antiguo. Otro beneficio es la deducción del 15% del IRPF sobre el valor de adquisición del BEV, hasta un máximo de 20.000€, o la exención del impuesto de matriculación al tener unas emisiones por tubo de escape menores a 120 g/km de CO₂. De momento esta última exención no está contemplada para ICEVs que usen combustible renovable, pese a que las emisiones netas por tubo de escape serían de 0 g/km de CO₂.

En muchas ciudades, por otro lado, se ofrece aparcamiento bonificado o gratuito para coches eléctricos en zonas reguladas (como el SER en Madrid) para BEV [148]. Asimismo, en algunas autopistas de la mayoría de países de la UE, los BEV pueden beneficiarse de peajes gratuitos o con importantes descuentos. En España, este descuento es de hasta el 100% en algunas zonas [149]. En el caso del vehículo con motor de combustión, también existen reducciones, aunque más limitadas, para aquellos que emitan menos de 120 g/km de CO₂ en gasolina o 108 g/km en diésel. Pero de nuevo, se consideran emisiones absolutas, sin excepción al combustible renovable.

Por otro lado, otro mecanismo de mercado muy reconocido en la UE diseñado para reducir las emisiones GEI son los ETS (*Emissions Trading System*) [150], o Sistema de Comercio de Emisiones, por el que se fija un límite máximo de emisiones en un sector industrial y la aviación, conocido como ETSI.

No obstante, en 2027 se pondrá en marcha el ETS2, de forma adicional al existente (ETSI). Este fue aprobado en 2023, y la novedad es que abarcará las emisiones de GEI de combustibles fósiles en sectores no cubiertos por ETSI [151], como el transporte por carretera y pequeñas industrias como las suministradoras de combustibles. De esta forma, si el combustible es renovable cumpliendo todos los requerimientos de sostenibilidad estipulados en la RED, no generaría derechos de emisión bajo este nuevo sistema, haciendo más competitivas las tecnologías renovables.



Otra directiva en fase de revisión es la de Impuestos a la Energía, o Directiva 2003/96/CE [152]. Esta establecía tipos impositivos mínimos para todos los productos energéticos. Actualmente, bajo la Directiva en vigor, los combustibles renovables tributan el mismo impuesto especial que el diésel o la gasolina convencional. En 2021, la Comisión Europea propuso cambios en esta Directiva para alinear la fiscalidad con el Pacto Verde Europeo, de forma que no se tributase lo mismo por energía renovable que por fósil [153]. Aun así, de momento la reforma no ha sido aprobada oficialmente por el Consejo de la Unión Europea.

En la propuesta, se establecen varios niveles de gravamen en cuanto a la electricidad y los combustibles renovables [154]. En un primer escalón, aparecen los combustibles fósiles y los biocombustibles de primera generación, con una tarifa de 10,75€/GJ. En un segundo, el gas natural, el GLP y los combustibles no renovables de origen no biológico. En un tercero, los biocombustibles con materias primas del Anexo IxB. Y, por último, la tarifa más baja se aplicaría a los bios avanzados (del Anexo IXA), a los RFNBO y a la electricidad, a los que se les aplicaría sólo 0,15€/GJ (este dato es el que se supuso en la estimación de TCO a 2035). Por tanto, sólo a los combustibles renovables más sostenibles se les aplicaría el mismo gravamen que a la electricidad; eso sí, independientemente de que la electricidad sea fósil o renovable, al establecer un mínimo uniforme.

Por otra parte, se observa la ausencia de ayudas o incentivos dirigidas a las empresas para fomentar que sus empleados con vehículo ICEV o HEV reposten combustible renovable en sus desplazamientos al trabajo. Esta medida podría contribuir a reducir la huella de carbono de la empresa (Scope 3) y reforzaría su imagen corporativa como entidad comprometida con la sostenibilidad.

De manera similar, en el transporte público de las ciudades que aún no está electrificado, existen oportunidades de reducción de emisiones de GEI. En Madrid, por ejemplo, a datos de verano de 2025, apenas el 6% de los taxis municipales [155] y el 20% de los autobuses [155] eran de 0 emisiones por tubo de escape. Fomentar el uso de combustibles renovables en los vehículos restantes podría no producir una mejora significativa en los contaminantes locales, pero sí contribuiría a reducir las emisiones de GEI del sector, promoviendo un parque de transporte urbano más sostenible.



En conjunto, estos marcos regulatorios muestran, de manera general, una preferencia normativa por la electrificación del transporte por carretera, mientras que los combustibles renovables permanecen en un rol más limitado y dependiente de desarrollos futuros, al no reconocerse en muchos casos la neutralidad climática del combustible, sino únicamente lo que sale físicamente del tubo de escape. Esto evidencia que la hoja de ruta europea prioriza un camino concreto hacia la descarbonización, aunque, como se ha explicado en este trabajo, la combinación de ambos enfoques resulta esencial para garantizar la sostenibilidad del transporte por carretera durante las próximas décadas.



Conclusiones

El presente trabajo ha permitido realizar un análisis comparativo integral entre vehículos eléctricos de batería (BEV) y vehículos de combustión interna alimentados con combustible 100 % renovable (ICEV/HEV), contribuyendo a enriquecer el debate científico y regulatorio en torno a la descarbonización del transporte ligero por carretera. Las principales aportaciones radican en la evaluación conjunta de parámetros ambientales, económicos y tecnológicos bajo un enfoque de ciclo de vida completo, así como en la propuesta de una visión prospectiva que resalte el carácter complementario de ambas alternativas.

- En primer lugar, en términos de impacto ambiental, los resultados obtenidos muestran que los vehículos de combustión (ICEV diésel y HEV de gasolina) con combustible renovable presentan menores emisiones de gases de efecto invernadero en ciclo de vida que los BEV, en especial, debido a la elevada huella de carbono asociada a la fabricación de baterías y a la penetración de energía fósil aún presente en la generación eléctrica de numerosos países. No obstante, en escenarios donde la penetración renovable en el mix sí es alta, o en escenarios a 2035, el desempeño ambiental de los BEV sí se aproxima al de los combustibles renovables, lo que refuerza la necesidad de acelerar la transición hacia un mix eléctrico descarbonizado.
- Puede concluirse que todos los combustibles renovables analizados en este trabajo se pueden considerar **combustibles neutros en carbono**, ya que, tal y como se reconoce en la RED, el CO₂ emitido por el tubo de escape se equilibra con el CO₂ retirado de la atmósfera para producirlos, bien sea a través de la fotosíntesis en crecimiento de la biomasa, para el caso de los biocombustibles, o bien sea a través de la captura de CO₂, en el caso de los RFNBO o e-fuels.
- En cuanto a emisiones de contaminantes locales, los ensayos demuestran que los vehículos ICEV modernos, tanto con combustible renovable como con convencional, cumplen con holgura los límites normativos (Euro 6/7) de emisiones en tubo de escape, incluso en condiciones reales de conducción, lo que genera que las diferencias en el total de contaminantes locales respecto a los BEV cada vez sean menos significativas.



- El análisis del consumo de agua revela que la presión hídrica es muy similar entre los vehículos de combustión con combustible renovable y los vehículos eléctricos, aunque en ambos casos superior a la de los vehículos de combustión fósil. Para los BEV, los resultados son similares independientemente del país donde circule el vehículo. En cambio, los combustibles renovables presentan una mayor disparidad: los e-fuels y la gasolina bio muestran una huella hídrica elevada, mientras que el diésel bio presenta un perfil más favorable.
- Desde la perspectiva económica, el estudio del coste total de propiedad (TCO) muestra que, aunque los BEV presentan un coste inicial superior, el cómputo total del análisis de todas las partidas de costes que implican el TCO (adquisición del vehículo, energía, seguros, mantenimiento, financiación) arroja resultados similares. La incorporación de impuestos y subvenciones o ayudas (actualmente sólo para BEV), tiende a desequilibrar este balance, debido a las políticas actuales que favorecen la tecnología eléctrica en detrimento de la de combustión con combustibles renovables.
- Respecto a la seguridad de suministro, se observa que ambas alternativas muestran cuellos de botella diferentes: mientras que los BEV dependen de materiales críticos como el litio o el cobalto, los ICEV dependen de la biomasa. Sin embargo, en esto último se concluye que, de acuerdo con los estudios revisados, la disponibilidad de materia prima sería suficiente para abastecer la demanda de combustibles en todos los segmentos de la movilidad actual, teniendo en cuenta la complementariedad con los RFNBO y la electricidad renovable. El reto está en movilizar esta materia prima y desplegar la capacidad de producción requerida para abastecer la demanda.
- En términos de madurez tecnológica e implantación, se concluye que la producción de combustibles renovables tiene aún un nivel de desarrollo inferior a la de la electricidad renovable, en especial la gasolina. No obstante, los combustibles renovables presentan la ventaja de integrarse en la infraestructura existente, permitiendo un despliegue inmediato. En contraste, la electrificación requiere de una expansión acelerada de la infraestructura de recarga, un incremento significativo en la capacidad renovable instalada y la complementariedad con sistemas de almacenamiento, como las baterías.



- Finalmente, se evidencia la dificultad de alcanzar la neutralidad climática haciendo uso exclusivo de una de las dos opciones. Los BEV son esenciales en un contexto de alta penetración de electricidad renovable, mientras que los combustibles renovables pueden desempeñar un papel fundamental en sectores y regiones donde la electrificación resulte más compleja o se disponga de una buena materia prima autóctona. Con ello se refuerza el carácter complementario de ambas soluciones y la necesidad de un marco regulatorio inclusivo que reconozca todas las vías de descarbonización y no potencie la electrificación por delante de los combustibles renovables.

En conjunto, estos resultados subrayan la contribución del presente estudio a la elaboración de un marco de análisis científico y técnico que pueda fundamentar el debate público, académico y regulatorio sobre el futuro del transporte sostenible por carretera en Europa, especialmente en el contexto de la próxima revisión del Reglamento de vehículo ligero prevista para 2026.



Líneas de trabajo futuro

A partir de los resultados obtenidos, se identifican varias áreas de investigación y desarrollo que permitirían profundizar y ampliar el presente estudio:

- **Hacer un estudio de sensibilidad utilizando diferentes tecnologías emergentes de baterías (LFP, estado sólido):** en este estudio se ha priorizado la NMC por ser la más empleada del mercado actualmente.
- Analizar el impacto de las emisiones contaminantes de la combustión de los ICEV y los HEV, así como de las partículas de desgaste, **en la calidad del aire, analizando diferentes estrategias de renovación del parque circulante.**
- **Consideración de mejoras en la economía circular aplicada a las tecnologías analizadas:** reciclaje de baterías de los coches eléctricos, recogida de biomasa para su empleo en la producción de combustibles renovables, etc.
- Realizar un **análisis de sensibilidad en la parte de TCO sobre diferentes escenarios de costes de combustible renovable y electricidad**, en porcentaje respecto al caso base propuesto.
- **Evaluación ampliada de los combustibles renovables**, incluyendo nuevos procesos de producción de e-fuels y biocombustibles avanzados, y materias primas más incipientes.
- **Estudios de percepción social y aceptación del usuario**, que permitan integrar las preferencias del consumidor en el diseño de estrategias de transición energética, además del informe de McKinsey & Company [83], del que se ha obtenido alguna figura.
- **Modelos prospectivos de despliegue**, que combinen escenarios de penetración de energías renovables, costes tecnológicos y disponibilidad de recursos críticos, con el fin de definir trayectorias de descarbonización realistas y económicamente viables.



Referencias

- [1] “¿Qué es el cambio climático? | Naciones Unidas.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- [2] “El Acuerdo de París | CMNUCC.” Accessed: Jul. 11, 2025. [Online]. Available: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- [3] Naciones Unidas, “El Acuerdo de París.” Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- [4] IPCC, *Global Warning of 1.5°C*. Cambridge University Press, 2022. doi: 10.1017/9781009157940.
- [5] “La Organización Meteorológica Mundial confirma que 2024 fue el año más cálido jamás registrado al superar en cerca de 1,55 °C los niveles preindustriales | Organización Meteorológica Mundial.” Accessed: Jul. 06, 2025. [Online]. Available: <https://wmo.int/es/news/media-centre/la-organizacion-meteorologica-mundial-confirma-que-2024-fue-el-ano-mas-calido-jamas-registrado-al>
- [6] Comisión Europea, “Cumplir el Pacto Verde Europeo.” Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_es
- [7] European Union, “RED III,” 2023, Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023L2413&qid=1699364355105>
- [8] Diario Oficial de la Unión Europea, “REGLAMENTO (UE) 2023-851 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO,” Apr. 2023.
- [9] European Union, “REGLAMENTO (UE) 2019-631 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO,” Apr. 2019, Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R0631-20240101>
- [10] IPCC, “IPCC Sixth Assessment Report - Chapter 6: Energy systems.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-6/?utm_source
- [11] Eprs, “CO2 emissions of new cars and vans.” [Online]. Available: <http://www.europarl.europa.eu/thinktank>
- [12] M. Negri and G. Bieker, “Life-cycle greenhouse gas emissions from passenger cars in the European Union A 2025 update and key factors to consider,” 2025. [Online]. Available: www.theicct.org
- [13] H. A. Alalwan, A. H. Alminshid, and H. A. S. Aljaafari, “Promising evolution of biofuel generations. Subject review,” Mar. 01, 2019, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ref.2018.12.006.
- [14] Repsol, “¿Qué son los combustibles 100% renovables?”, Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.repsol.com/es/combustibles-renovables/que-son-los-combustibles-renovables/index.cshtml>
- [15] Diario Oficial de la Unión Europea, “DIRECTIVA (UE) 2018/2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables,” Dec. 2018.
- [16] N. P. E. Salmerón, “Oportunidades laborales en el sector en torno a los combustibles renovables - Curso EOI,” 2025.
- [17] “Repsol, pionera en producir gasolina 100% renovable a escala industrial.” Accessed: Oct. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.repsol.com/es/sala-prensa/notas-prensa/2025/repsol-pionera-producir-gasolina-cien-por-cien-renovable-escala-industrial/index.cshtml>



- [18] “ReFuelEU Aviation: un transporte aéreo sostenible | EUR-Lex.” Accessed: Sep. 15, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/refuelev-aviation-sustainable-air-transport.html>
- [19] “Reglamento - 2023/1805 - EN - EUR-Lex.” Accessed: Sep. 15, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/ALL/?uri=CELEX:32023R1805>
- [20] “Tecnología de vehículos eléctricos | Clean Vehicle Rebate Project.” Accessed: Aug. 30, 2025. [Online]. Available: <https://cleanvehiclerebate.org/es/ev/tecnologia/vehiculos-electricos>
- [21] F. Cerezo, “Coches ‘eléctricos’ para no vivir pendientes de un enchufe - El Mundo.” Accessed: Sep. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.elmundo.es/motor/2025/06/02/683d277021efa0be358b4584.html>
- [22] “The Automobile Industry Pocket Guide 2025/2026 - ACEA - European Automobile Manufacturers’ Association.” Accessed: Oct. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.acea.auto/publication/the-automobile-industry-pocket-guide-2025-2026/>
- [23] “Ventas de coches en 2025 | OCU.” Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: https://www.ocu.org/coches/coches/noticias/ventas-coches-1semestre25?utm_source
- [24] Boletín Oficial del Estado, “Real Decreto 1085/2015, de 4 de diciembre, de fomento de los biocarburantes,” Dec. 2015, [Online]. Available: <http://www.boe.es>
- [25] Boletín Oficial del Estado, “Real Decreto 376/2022, de 17 de mayo, por el que se regulan los criterios de sostenibilidad y de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de los biocarburantes, biolíquidos y combustibles de biomasa, así como el sistema de garantías de origen de los gases renovables.,” May 2022. [Online]. Available: <https://www.boe.es>
- [26] Repsol Technology Lab, “Dossier Combustibles Renovables - Argumentario Técnico/Comercial,” 2025.
- [27] “UNE-EN 14214:2013 Productos petrolíferos líquidos. Ésteres met...” Accessed: Oct. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0050782>
- [28] “UNE-EN 15940:2016+A1:2019 Combustibles para automoción. Gasóle...” Accessed: Oct. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0061306>
- [29] “Combustible HVO: qué es, ventajas y origen | Repsol.” Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.repsol.com/es/energia-avanzar/movilidad/hvo-hidrobiodiesel/index.cshml>
- [30] “La gama de Stellantis es totalmente compatible con el combustible ecológico HVO | Corporate Communications | Stellantis Media.” Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.media.stellantis.com/es-es/corporate-communications/press/la-gama-de-stellantis-es-totalmente-compatible-con-el-combustible-ecologico-hvo?utm_source
- [31] “UNE-EN 228:2013+A1:2017 Combustibles para automoción. Gasolina...” Accessed: Sep. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0058910>
- [32] “Estaciones de servicio HVO/XTL en todo el mundo – eFuelsNow.” Accessed: Sep. 05, 2025. [Online]. Available: <https://efuelsnow.de/tankstellen-karte>
- [33] “IDAE -.” Accessed: Jul. 28, 2025. [Online]. Available: <https://coches.idae.es/base-datos/segmento>
- [34] FEV, “Repsol-Passenger Car-TCO Study,” 2024.
- [35] Unión Europea, “(EURO 7) REGLAMENTO (UE) 2024 del Parlamento Europeo y del Consejo,” Apr. 2024, Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available:



<https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2024/04/12/euro-7-council-adopts-new-rules-on-emission-limits-for-cars-vans-and-trucks/>

- [36] Ricardo Energy & Environment, “Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA.”
- [37] “IEA – International Energy Agency.” Accessed: Sep. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/>
- [38] ENTSO-E, “Statistical Factsheet 2024”.
- [39] “Estadísticas | CORES.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.cores.es/es/estadisticas>
- [40] W. Lilley *et al.*, “E-Fuels: A techno-economic assessment of European domestic production and imports towards 2050-Update,” Apr. 2024.
- [41] ICCT, “The EV Transition Check: Measuring progress towards zero-emission for passenger cars in the European Union - International Council on Clean Transportation.” Accessed: Sep. 12, 2025. [Online]. Available: <https://theicct.org/publication/ev-transition-check-sep25/>
- [42] Thylmann and Daniel, “Water Scarcity Footprint of Vehicles -Collaboration Study Sphera-Repsol,” 2024.
- [43] Sphera, “Analysis of Critical Raw Materials -Collaboration Study Sphera-Repsol,” Jun. 2025.
- [44] Seat-Repsol, “Estudio Emisiones Contaminantes - Colaboración Seat-Repsol,” Feb. 2025.
- [45] Repsol - DC Tecnología y Corporate Venturing, “Comparativa de emisiones de GEI en ciclo de vida entre distintas opciones tecnológicas de vehículos turismos - Insight Tecnología y CV,” Oct. 2020.
- [46] JEC, “Well-to-Tank report v5,” 2020, doi: 10.2760/959137.
- [47] “Home - Cars CO2 Comparator.” Accessed: Oct. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.carsco2comparator.eu/>
- [48] M. Messagie, “Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles,” 2017.
- [49] D. L. N. Hall, “Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions,” *ICCT*, vol. 11, no. 5, Feb. 2018, doi: 10.1088/1748-9326/11/5/054010.
- [50] “Electric Vehicle Outlook | BloombergNEF.” Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/insights/clean-transport/electric-vehicle-outlook/>
- [51] E. Emilsson, “Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status 2019 on Energy Use, CO 2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling,” 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.29735.70562.
- [52] “China - Countries & Regions - IEA.” Accessed: Jul. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/countries/china/energy-mix>
- [53] “World Energy Outlook 2024 – Analysis - IEA.” Accessed: Sep. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024?language=es>
- [54] “[XLS + PDF] Forecast: Electric Power Transmission and Distribution Losses in China.” Accessed: Sep. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.reportlinker.com/dataset/15dd5260c0376e115f0483a206ea418ae4b7e97e>
- [55] R. Jiménez, T. Serebrisky, and J. Mercado, “Dimensionando las pérdidas de electricidad en ELECTRICIDAD,” 2014.
- [56] AVL, “A055041 REPSOL-EMISSION FACTORS STUDY,” Sep. 2025.
- [57] “El Gobierno propone elevar al 14% la cuota obligatoria de biocarburantes en 2026 - Estaciones de Servicio.” Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.interempresas.net/Estaciones-servicio/Articulos/610367-El-Gobierno-propone-elevar-al-14-por-ciento-la-cuota-obligatoria-de-biocarburantes-en-2026.html>



- [58] Diario Oficial de la Unión Europea, “DIRECTIVA (UE) 2018/ 2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO - de 11 de diciembre de 2018 - relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables,” Dec. 2018.
- [59] IEA, “Towards Common Criteria for Sustainable Fuels,” 2024. [Online]. Available: www.iea.org
- [60] Eionet, “Greenhouse gas intensities of road transport fuels in the EU in 2018,” Nov. 2020. [Online]. Available: www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cme
- [61] Forum Energii, “Energy Transformation in Poland,” 2025. [Online]. Available: www.forum-energii.eu
- [62] Diario Oficial de las Comunidades Europeas, “DIRECTIVA 2000/53/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 18 de septiembre de 2000 relativa a los vehículos al final de su vida útil,” Sep. 2000.
- [63] EEA, “Contribution of the transport sector to total emissions of the main air pollutants.” Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/contribution-of-the-transport-sector-6>
- [64] Diario Oficial de la Unión Europea, “DIRECTIVA 2003/17/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO,” 2003.
- [65] “¿Qué son las normas Euro y por qué evolucionan?” Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.revistaautocrash.com/que-son-las-normas-euro-y-por-que-evolucionan/>
- [66] ICCT, “A technical summary of Euro 6/VI vehicle emissions standards,” Jun. 2016. Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf?utm_source
- [67] “DieselNet: Engines & Clean Transportation.” Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: <https://dieselnet.com/>
- [68] M. Granda, “El automóvil logra que los países de la UE acuerden retrasar la nueva norma de emisiones hasta 2027,” *CincoDías*, Madrid/Bruselas, Sep. 25, 2023. Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://cincodias.elpais.com/companias/2023-09-25/el-automovil-logra-que-los-paises-de-la-ue-acuerden-retrasar-la-nueva-normativa-de-emisiones-hasta-2027.html#>
- [69] “Emission Standards: Europe: Cars and Light Trucks: RDE Testing.” Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: https://dieselnet.com/standards/eu/ld_rde.php?utm_source
- [70] Diario Oficial de la Unión Europea, “Directiva (UE) 2024/2881 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2024, sobre la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, (versión refundida),” Oct. 2024.
- [71] Boletín Oficial del Estado, “Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética,” May 2021. [Online]. Available: <https://www.boe.es>
- [72] “DGT - Distintivo ambiental.” Accessed: Sep. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.dgt.es/nuestros-servicios/tu-vehiculo/tus-vehiculos/distintivo-ambiental/>
- [73] “[Press release] New Real-Driving Emissions regulation: A great step forward—though not yet far enough to fully control toxic nitrogen oxide emissions - International Council on Clean Transportation.” Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: <https://theicct.org/press-release-new-real-driving-emissions-regulation-a-great-step-forward-though-not-yet-far-enough-to-fully-control-toxic-nitrogen-oxide-emissions/>



- [74] Y. Liu *et al.*, “Comparative analysis of non-exhaust airborne particles from electric and internal combustion engine vehicles,” *J Hazard Mater*, vol. 420, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126626.
- [75] D. Tecnología y Corporate Venturing, “PROPUESTA DE REVISIÓN DEL REGLAMENTO SOBRE EMISIONES CONTAMINANTES PARA VEHÍCULOS LIGEROS Y PESADOS (EURO 7),” Nov. 2022.
- [76] “Sistema Español de Inventario de Emisiones.” Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-.html>
- [77] Parlamento Europeo, “Euro 7: Deal on new EU rules to reduce road transport emissions | Noticias | Parlamento Europeo.” Accessed: Sep. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20231207IPR15740/euro-7-deal-on-new-eu-rules-to-reduce-road-transport-emissions>
- [78] Á. Palacio, “Análisis de Ciclo de Vida de la producción de e-metanol,” Jul. 2025.
- [79] “Water scarcity | UNICEF.” Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: https://www.unicef.org/wash/water-scarcity?utm_source
- [80] “State of Global Water Resources 2023.” Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: https://wmo.int/publication-series/state-of-global-water-resources-2023?utm_source
- [81] L. Wang, W. Shen, H. C. Kim, T. J. Wallington, Q. Zhang, and W. Han, “Life cycle water use of gasoline and electric light-duty vehicles in China,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 154, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104628.
- [82] A. A. Ahmed, M. A. Nazzal, B. M. Darras, and I. M. Deiab, “Global warming potential, water footprint, and energy demand of shared autonomous electric vehicles incorporating circular economy practices,” *Sustain Prod Consum*, vol. 36, pp. 449–462, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.spc.2023.02.001.
- [83] McKinsey & Company, “New twists in the electric-vehicle transition: A consumer perspective,” 2025.
- [84] M. Á. Medina, “ICCT: El coche eléctrico avanza en Europa: ya es el más barato de conducir, supone el 17% de las ventas y hay un millón de puntos de recarga | Clima y Medio Ambiente | EL PAÍS.” Accessed: Sep. 12, 2025. [Online]. Available: <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2025-09-10/el-coche-electrico-avanza-en-europa-ya-es-el-mas-barato-de-conducir-supone-el-17-de-las-ventas-y-hay-un-millon-de-puntos-de-recarga.html>
- [85] “Commodity prices, forecasts, news & market analysis | Argus Media.” Accessed: Sep. 15, 2025. [Online]. Available: https://www.argusmedia.com/en?utm_source=google&utm_medium=ppc&utm_campaign=glo-argus-commodities-09-2023&utm_content=glo-argus-commodities-09-2023-google-ad&utm_term=argus&campaignid=20528917656&adgroupid=169681384945&creative=721044004967&matchtype=e&network=g&device=c&keyword=argus&gad_source=1&gad_campaignid=20528917656&gbraid=0AAAAAqMCVG2GOAmyQ23XmyFe8nymn6HSq&gclid=Cj0KCQjw8p7GBhCjARIsAEhghZ3DnbMbnZH7Relo3-xc7wACloBGeOvFUIDQg169vm1lQvuP3t7P3awaAtauEALw_wcB
- [86] “Cuánto cuesta cargar un coche eléctrico en España.” Accessed: Oct. 13, 2025. [Online]. Available: <https://movilidadelectrica.com/precio-cargar-coche-electrico/>
- [87] “Negocio Eléctrico en España | Red Eléctrica.” Accessed: Sep. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.ree.es/es>
- [88] “Agencia Tributaria: Ámbito temporal, objeto, periodo impositivo en el que se aplica e importe de la deducción.” Accessed: Aug. 06, 2025. [Online]. Available:



https://www3.agenciatributaria.gob.es/Sede/ayuda/manuales-videos-folletos/manuales-practicos/irpf-2024/c16-deducciones-generales-cuota/deducciones-adquisicion-vehiculos-electricos-puntos-recarga/deduccion-adquisicion-vehiculos-electricos/ambito-temporal-objeto-periodo-que-deduccion.html?utm_source

- [89] “Simulador de préstamo para coches - Financiación a medida | BBVA.” Accessed: Aug. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.bbva.es/personas/productos/prestamos/simulador-prestamos-coches.html>
- [90] “▷ Plan MOVES III - Guía completa. Toda la información.” Accessed: Aug. 06, 2025. [Online]. Available: <https://movilidadelectrica.com/plan-moves-iii/>
- [91] “▷ Renta 2024: ¿Cómo funcionan los tramos del IRPF? | Blog Bankinter.” Accessed: Aug. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.bankinter.com/blog/finanzas-personales/renta-tramos-irpf#:~:text=Primer%20tramo%20hasta%2012.450%20euros,59.999%20euros%20con%20un%2037%25>
- [92] “» Claves para desgravar IRPF con tu coche eléctrico - Renault.” Accessed: Aug. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.renault.es/blog/trucos-consejos/desgravar-irpf-coche-electrico.html>
- [93] “Nuevo sistema de cálculo del impuesto de matriculación | HispaColey Abogados.” Accessed: Aug. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.hispacoley.com/blog/derecho-administrativo/nuevo-sistema-de-calculo-del-impuesto-de-matriculacion/>
- [94] “Impuesto sobre Vehículos de Tracción Mecánica (IVTM). Cálculo de la tarifa - Portal del Contribuyente del Ayuntamiento de Madrid.” Accessed: Aug. 05, 2025. [Online]. Available: <https://agenciatributaria.madrid.es/portales/contribuyente/es/Impuestos-tasas-y-precios-publicos/Vehiculos-de-Traccion-Mecanica-IVTM-/Impuesto-sobre-Vehiculos-de-Traccion-Mecanica-IVTM-Calculo-de-la-tarifa/?vgnextfmt=default&vgnextoid=cc561a0367ac8210VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnnextchannel=9ee1e5bcc9c78710VgnVCM1000008a4a900aRCRD>
- [95] “Desglose e impuestos del precio de la gasolina | Repsol.” Accessed: Aug. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/desglose-precio-gasolina/>
- [96] Comisión Europea, “Revisión de la Directiva sobre fiscalidad de la energía (DFE) Preguntas y respuestas,” Jul. 2021.
- [97] “Impuesto de la electricidad: ¿Qué es y cómo se calcula? | Repsol.” Accessed: Aug. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/impuesto-electricidad-que-es-como-se-paga/>
- [98] “España es el segundo país de la UE que menos impuestos recauda por vehículo al año.” Accessed: Oct. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.economista.es/motor/noticias/13522295/08/25/espana-es-el-segundo-pais-de-la-ue-que-menos-impuestos-recauda-por-vehiculo-al-ano.html>
- [99] Imperial College London, “Sustainable Biomass Availability in the EU, to 2050,” 2021.
- [100] “Statistical Report 2024 Publications - FuelsEurope.” Accessed: Oct. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.fuelseurope.eu/publications/publications/statistical-report-2024>
- [101] E. Commission, “Development of outlook for the necessary means to build industrial capacity for drop-in advanced biofuels Annex 2 Report on Task 2,” 2024, doi: 10.2777/815748.
- [102] Politecnico di Torino, “Preliminary assessment of biofuels potential in IBERIA,” Jan. 2025.
- [103] OGCI-ARGUS, “Biomass for Marine 2025,” Feb. 2025.



- [104] R. A. Jacobson, S. Jones, D. De La, T. Ugarte, and K. L. Kline, “Mapping and Synthesis of International Biomass Supply Assessments,” 2025. [Online]. Available: www.osti.gov
- [105] “El transporte se enfrenta al dilema del mejor combustible.” Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.agenciasinc.es/Reportajes/El-transporte-se-enfrenta-al-dilema-del-mejor-combustible?utm_source
- [106] “Why e-fuels are not the solution for cars | T&E.” Accessed: Sep. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.transportenvironment.org/topics/cars/efuels>
- [107] “BOE-A-2020-1066 Circular 3/2020, de 15 de enero, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, por la que se establece la metodología para el cálculo de los peajes de transporte y distribución de electricidad.” Accessed: Aug. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-1066>
- [108] C. Hamelinck, M. Defiliet, B. Smeets, and E. Van Den Heuvel, “Conversion efficiencies of fuel pathways for Used Cooking Oil,” Feb. 2021. [Online]. Available: www.studiogearup.com
- [109] Clean Hydrogen Partnership, “Strategic Research and Innovation. Agenda 2021 - 2027,” 2022.
- [110] International Energy Agency, “Global Hydrogen Review 2023,” 2023. [Online]. Available: www.iea.org
- [111] “Utility-scale batteries and pumped storage return about 80% of the electricity they store - U.S. Energy Information Administration (EIA).” Accessed: Aug. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=46756>
- [112] “Critical Mineral Resources: National Policy and Critical Minerals List | Congress.gov | Library of Congress.” Accessed: Oct. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.congress.gov/crs-product/R47982>
- [113] “Critical raw materials - Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs.” Accessed: Oct. 08, 2025. [Online]. Available: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en?utm_source
- [114] “Global Critical Minerals Outlook 2024 – Analysis - IĖA.” Accessed: Oct. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>
- [115] A. Basu, “ARE CRITICAL MINERALS FUELING OR FAILING THE FUTURE OF GREEN HYDROGEN?”
- [116] “Methanol To Gasoline (MTG) Technology Process | ExxonMobil Product Solutions.” Accessed: Sep. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.exxonmobilchemical.com/en/catalysts-and-technology-licensing/methanol-to-gasoline-technology?>
- [117] “Comienza a producir comercialmente la primera planta del mundo que convierte basura en biocombustible - BioEconomia.info.” Accessed: Sep. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.bioeconomia.info/2022/05/27/comienza-a-producir-comercialmente-la-primera-planta-del-mundo-que-convierte-basura-en-biocombustible/?>
- [118] “Combustibles sintéticos: energía neutra con hidrógeno y CO₂ | Repsol.” Accessed: Sep. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/ejes-sostenibilidad/medio-ambiente/economia-circular/nuestros-proyectos/combustibles-sinteticos/index.cshml>
- [119] N. Fernández-Cuesta, *No se trata de si es verde o no, sino de si elimina o reduce las emisiones.* 2024.
- [120] SolarPower Europe, “European Market Outlook for Battery Storage 2025-2029,” 2025.



- [121] “Hybrid energy parks face headwinds in Europe.” Accessed: Sep. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.pveurope.eu/hybrid-generators/hybrid-energy-parks-face-headwinds-europe>
- [122] “Introduction to Electric Vehicles: BEV vs PHEV vs HEV | Zecar | Resources | News.” Accessed: Sep. 01, 2025. [Online]. Available: <https://zecar.com/resources/what-is-the-difference-between-bev-vs-phev-vs-hev>
- [123] “How Long Does It Take to Charge an Electric Car? | Pod.” Accessed: Sep. 01, 2025. [Online]. Available: https://pod-point.com/guides/driver/how-long-to-charge-an-electric-car?srsltid=AfmBOopqUyvXlIONxkOw9q_WwZ1snAvB89BrLXanib5TWdB_DPmgyYb
- [124] “By 2030 EVs represent more than 60% of vehicles sold globally, and require an adequate surge in chargers installed in buildings – Analysis - IEA.” Accessed: Oct. 02, 2025. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/by-2030-evs-represent-more-than-60-of-vehicles-sold-globally-and-require-an-adequate-surge-in-chargers-installed-in-buildings?utm_source=
- [125] G. Wolff Elósegui, “El papel de la concienciación en el despliegue de los combustibles renovables,” Oct. 2025. [Online]. Available: www.asepa.es
- [126] The Objective, “La UE tiene ya 11 millones de EV con 950.000 puestos de recarga.” Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://theobjective.com/economia/2025-06-16/coches-electricos-europa-recarga-powerdot-chargeup-europa/>
- [127] Mobility Portal Europe, “Record! Europe surpasses 900,000 public charging points.” Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://mobilityportal.eu/record-europe-surpasses-900000-public-charging-points/>
- [128] IEA, “Global EV Outlook 2025,” 2025. [Online]. Available: www.iea.org
- [129] “Alternative Fuels Infrastructure - European Commission.” Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-transport/alternative-fuels-sustainable-mobility-europe/alternative-fuels-infrastructure_en
- [130] EVBoosters, “The acceleration of the EV charging infrastructure in Europe.” Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://evboosters.com/ev-charging-news/the-acceleration-of-the-ev-charging-infrastructure-in-europe-2/>
- [131] The Objective, “España llega a 46.684 puntos de recarga para coches eléctricos, un 2,9% más que en 2024.” Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://theobjective.com/motor/2025-06-09/subida-puntos-recarga-coches-electricos/>
- [132] J. L. Cano, “Radiografía de los puntos de recarga en España: crecen más rápido que los coches eléctricos pero la media de uso es menor.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: https://www.elespanol.com/motor/20250222/radiografia-puntos-recarga-espana-crecen-rapido-coches-electricos-media-uso-menor/925907574_0.html?
- [133] “Reve, tu aplicación de puntos de recarga de España.” Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.mapareve.es/mapa-puntos-recarga>
- [134] “TENtec Map Viewers - Explore the TEN-T Network | European Transport Infrastructure.” Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://webgate.ec.europa.eu/tentec-maps/web/public/screen/home>
- [135] Liam McLoughlin, “National infrastructure initiatives help drive rising European EV sales | Electric Vehicle Charging & Infrastructure.” Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.evcandi.com/feature/national-infrastructure-initiatives-help-drive-rising-european-ev-sales>
- [136] T&E, “Public charging in Europe: where are we at?” Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.transportenvironment.org/articles/public-charging-in-europe-where-are-we-at>



- [137] “Repsol habilita estaciones de servicio en Madrid para el intercambio de baterías eléctricas de coche en 5 minutos.” Accessed: Oct. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.telemadrid.es/programas/telenoticias-1/Repsol-habilita-estaciones-de-servicio-en-Madrid-para-el-intercambio-de-baterias-electricas-de-coche-en-5-minutos-2-2814638548-20250909052826.html>
- [138] Eranovum, “¿Cuántos coches eléctricos hay en España?” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://eranovum.energy/es/blog/cuantos-coches-electricos-espana/>
- [139] SGS Inspire, “Europe: HVO 100 available in eight European countries.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://inspire.sgs.com/content/100102941/europe-pure-hvo-available-in-nine-european-countries>
- [140] UTA Edenred, “HVO – the new green fuel.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://web.uta.com/en/alternative-fuels/hvo-100>
- [141] “MultiServicios para profesionales del Transporte | OnTurtle.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://onturtle.eu/>
- [142] Argus, “HVO demand may hit record as EU rules tighten | Latest Market News.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2706126-hvo-demand-may-hit-record-as-eu-rules-tighten>
- [143] M. Brons, L. Dijkstra, J. Nicolás Ibáñez, H. P. Regional, and U. Policy, “ROAD INFRASTRUCTURE IN EUROPE: ROAD LENGTH AND ITS IMPACT ON ROAD PERFORMANCE Working Papers,” 2022. doi: 10.2776/21558.
- [144] “misc.maintitle | Electricity Maps.” Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: https://app.electricitymaps.com/map/live/fifteen_minutes
- [145] Diario Oficial de la Unión Europea, “REGLAMENTO (UE) 2023/1804 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, relativo a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos,” Sep. 2023.
- [146] S. Amadoz, “Las nuevas etiquetas de la DGT: adiós a la ECO y una categoría D más coherente.” Accessed: Sep. 05, 2025. [Online]. Available: <https://motor.elpais.com/actualidad/las-etiquetas-que-piden-los-grupos-ecologistas-desde-2021-adios-a-la-eco-y-una-categoria-d-mas-coherente/>
- [147] “Nueva Ley de Movilidad Sostenible: luz verde al cambio de las pegatinas de la DGT con esta iniciativa recién aprobada por el Gobierno de España.” Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.autobild.es/motor/nueva-ley-movilidad-sostenible-luz-verde-cambio-las-pegatinas-dgt-con-esta-iniciativa-recien-aprobada-por-gobierno-espana_6514038_0.html
- [148] Hyundai, “¿Es posible ahorrar dinero con un coche eléctrico?” Accessed: Sep. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.hyundai.com/es/es/zonaeco/eco-life/recarga/ahorrar-dinero-vehiculo-electrico>
- [149] “Descuentos | Ventajas Autopistas.” Accessed: Sep. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.autopistas.com/tarifas-y-descuentos/descuentos/>
- [150] “About the EU ETS - European Commission.” Accessed: Sep. 06, 2025. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-markets/eu-emissions-trading-system-eu-ets/about-eu-ets_en
- [151] “ETS2: buildings, road transport and additional sectors - European Commission.” Accessed: Sep. 06, 2025. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-markets/ets2-buildings-road-transport-and-additional-sectors_en



- [152] Diario Oficial de la Unión Europea, “DIRECTIVA 2003/96/CE DEL CONSEJO, por la que se reestructura el régimen comunitario de imposición de los productos energéticos y de la electricidad,” Oct. 2003.
- [153] “EUR-Lex - 52021PC0563 - EN - EUR-Lex.” Accessed: Sep. 06, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:52021PC0563>
- [154] A. García Valera, “Reforma de la Directiva de la Fiscalidad de la Energía | EY España.” Accessed: Sep. 06, 2025. [Online]. Available: https://www.ey.com/es_es/insights/tax/reforma-de-la-directiva-de-la-fiscalidad-de-la-energia?
- [155] Movilidad Eléctrica, “Taxis eléctricos en Madrid: cuántos hay y qué marcas y modelos.” Accessed: Sep. 08, 2025. [Online]. Available: <https://movilidadelectrica.com/taxis-electricos-madrid/>