

La descarbonización del transporte pesado

Manuel Pérez Bravo

Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), ETS ICAI,
Universidad Pontificia Comillas

1. Introducción

El transporte representa la mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero en la economía española, alcanzando más del 28 % del total en 2023 (IEA, 2024). Por ello, reducir su impacto ambiental es clave para cumplir con los objetivos nacionales e internacionales de disminución de emisiones. Además, este sector juega en España un papel especialmente importante en la economía, debido a factores como su posición geográfica, la distribución desigual de la población, y la importancia de sectores como el turismo, la construcción, o el sector agroalimentario, que dependen en gran medida del transporte. En consecuencia, la relación entre las emisiones de este sector y el PIB de España está entre las más altas de Europa, con unas emisiones medias de 68 MtCO₂e al año por cada M€ de PIB (Eurostat, 2024). Su actividad económica no es tan intensiva en emisiones del transporte como otros países del este de Europa (116 en Bulgaria, 101 en Polonia), pero está todavía lejos de los valores observados en los países nórdicos (22 en Noruega, 29 en Suecia, 35 en Dinamarca), los Países Bajos (32) o Irlanda (24).

Sin embargo, dada la importancia de los servicios de transporte en el proceso de desarrollo, reducir las emisiones de carbono relacionadas con este sector sin comprometer el crecimiento económico es crucial para combatir el cambio climático de manera compatible con el aumento

de los estándares de vida en los diferentes países. Por una parte, es posible construir un desarrollo económico más eficiente respecto a sus necesidades de transporte, con actividades menos intensivas en desplazamientos y con la optimización de las operaciones. En segundo lugar, cada una de las operaciones necesarias puede utilizar tecnologías y combustibles más sostenibles que reduzcan su impacto. Precisamente, en los países europeos con menores intensidades de emisiones del transporte respecto a su PIB observamos una combinación de ambos.

Dentro de las emisiones del transporte doméstico, en torno al 68 % provenían del transporte ligero en 2022 (58 % coches, 2 % motocicletas y ciclomotores, 8 % transporte ligero de mercancías), mientras las emisiones del transporte pesado están en torno al 32 % y están una vez más lideradas por el sector de la carretera (24 % camiones, 4 % marítimo, 3 % aviación, y menos del 1 % provienen del ferrocarril). Si bien existe hoy en día consenso sobre la viabilidad y beneficios de la electrificación del transporte ligero (IEA, 2024), el transporte pesado es todavía sujeto de discusión en cuanto a las diferentes alternativas para su descarbonización. La principal razón es que estos vehículos necesitan motorizaciones con mayor potencia y autonomía, por lo tanto una mayor densidad energética del combustible, en la que las baterías actuales tienen más dificultad para competir con los combustibles líquidos o gaseosos (ya sean fósiles o renovables).

Numerosos análisis internacionales apuntan hacia una amplia electrificación del transporte pesado por carretera (International Transport Forum, 2023; Plötz, 2022), pero no en todos los segmentos, necesitando también el uso de combustibles renovables en diferente proporción en función del país y el caso de uso.

Los sectores del marítimo y la aviación son, sin duda, aquellos para los cuales la electrificación es menos competitiva, de nuevo, por la potencia y autonomía requeridas. Para el sector marítimo, se erigen como principales opciones el metanol y el amoníaco (McKinlay *et al.*, 2021; Osman *et al.*, 2024; Xing *et al.*, 2021). El límite al uso de amoníaco recae sobre todo en la potencia limitada de las motorizaciones que hoy en día lo utilizan (Maritime Forecast, 2024). El metanol, sin embargo, sí es posible utilizarlo en embarcaciones de mayor potencia, pero su elaboración a partir de hidrógeno renovable necesita también dióxido de carbono, y este carbono solo podrá provenir de captura biogénica o captura directa del aire a partir de 2040 (European Parliament, 2023a). Es por ello que el metanol se concibe como una solución más versátil y transversal a todos los tipos de buques, pero de menor recorrido a futuro, por la dificultad que supone la captura del dióxido de carbono para su elaboración.

Contrario al metanol, el amoníaco no contiene carbono, por lo que su elaboración puede ser únicamente a partir del hidrógeno renovable y nitrógeno obtenido con energía renovable (Lagouvardou *et al.*, 2023). Sin embargo, como decíamos, el amoníaco se utiliza en motorizaciones de menor potencia, y tanto el coste del buque como del combustible, son hoy en día superiores al metanol y al resto de combustibles fósiles tradicionalmente utilizados.

En el sector de la aviación, la descarbonización se concibe desde el punto de vista del combustible utilizado y no tanto de la tecnología de motorización. Entre los combustibles SAF (*Sustainable Aviation Fuels*) aprobados por la ICAO (2024) para la aviación comercial, destacan algunos de origen biológico (conocidos como bio-SAF, mayor viabilidad económica

a corto y medio plazo), y algunos combustibles sintéticos y electro-combustibles (conocidos como e-SAF) en el medio plazo (Schmidt *et al.*, 2023).

Dado que el sector de la carretera es responsable del 76 % de las emisiones derivadas del transporte pesado doméstico en España, este capítulo se enfoca sobre todo en las vías de descarbonización de este sector.

Figura 1.

Emisiones derivadas del transporte en España

Fuente: elaboración propia a partir de la Encuesta Permanente de Transporte de Mercancías por Carretera (European Environment Agency, 2024).

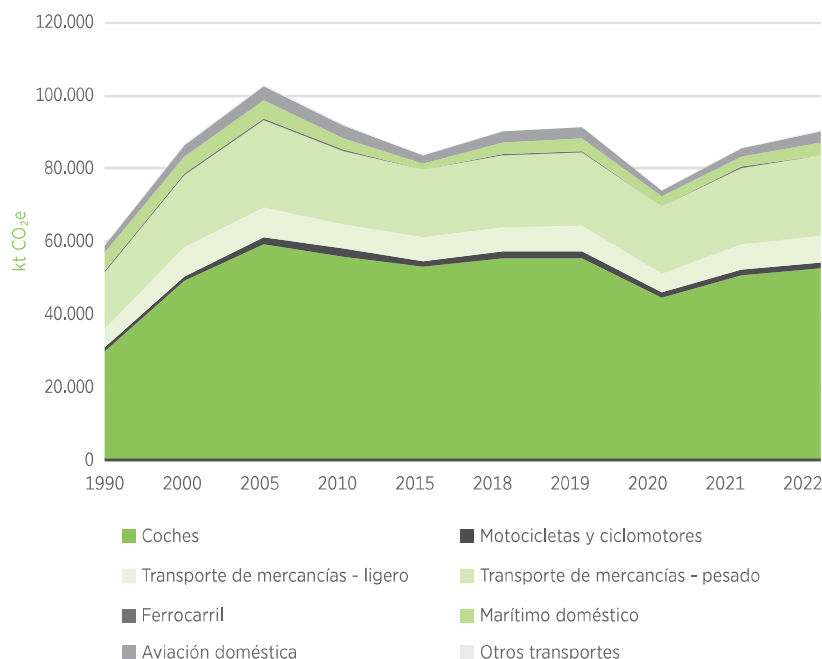
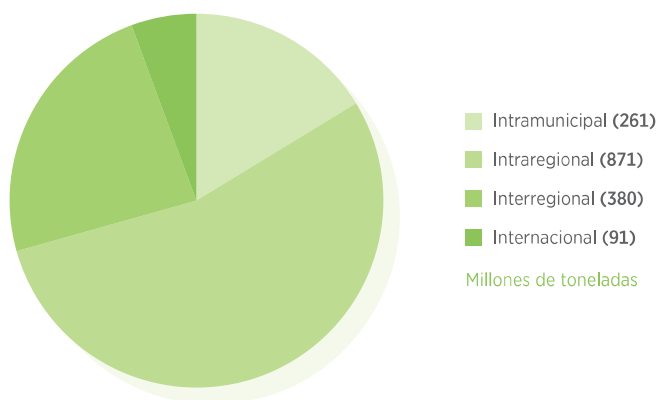


Figura 2.

Millones de toneladas transportadas en 2023 (España), según tipo de desplazamiento

Fuente: elaboración propia a partir de la Encuesta Permanente de Transporte de Mercancías por Carretera (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024).



La combinación de mayores potencias y autonomías en el transporte pesado dificultan sin lugar a duda su electrificación, es por ello que es importante caracterizar los diferentes casos de uso para poder identificar soluciones adecuadas a cada uno de ellos. En este sentido, la *Encuesta permanente de transporte de mercancías por carretera* (Ministerio de Transportes y Movilidad Sos-

tenible, 2024) provee de diferentes magnitudes que caracterizan la demanda, donde es posible ver cómo, en 2023, la mayoría de toneladas fueron transportadas dentro del ámbito regional (54 %), seguido del interregional (24 %), el intramunicipal (16 %), y por último, el internacional (6 %).

Focalizando únicamente en el transporte interior, el 75 % de las toneladas transportadas corresponden a flujos dentro de las Comunidades Autónomas (ámbitos municipal y regional), concentrados en Andalucía (13 %), Cataluña (12 %), y la Comunidad Valenciana (11 %). Entre las Comunidades con mayor proporción de exportación a otras Comunidades están la Comunidad Foral de Navarra (45 %), Castilla-La Mancha (44 %) y la Comunidad de Madrid (43 %).

Figura 3.
Flujos de transporte de mercancías por carretera entre las comunidades autónomas peninsulares en España. Tamaño de los nodos proporcional al volumen de mercancías saliente de cada comunidad

Fuente: elaboración propia a partir de la Encuesta Permanente de Transporte de Mercancías por Carretera (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024).

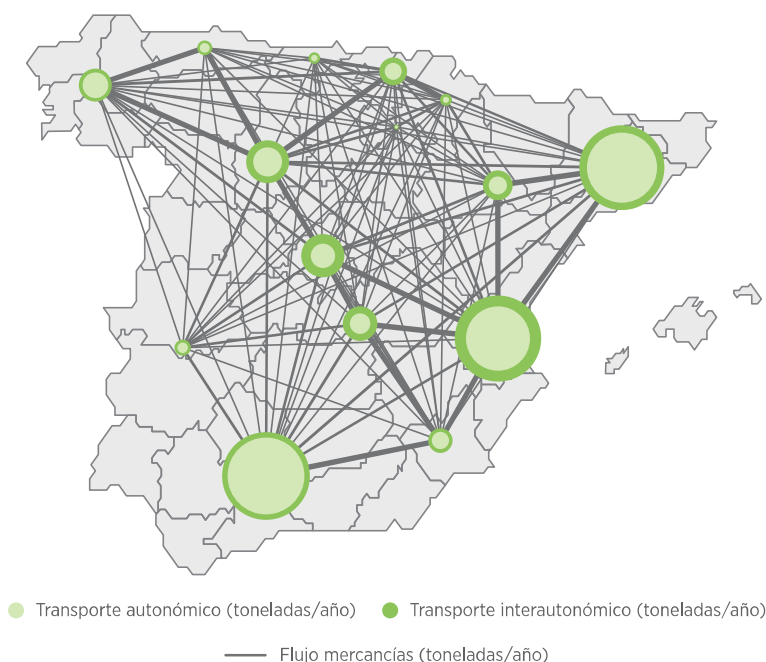
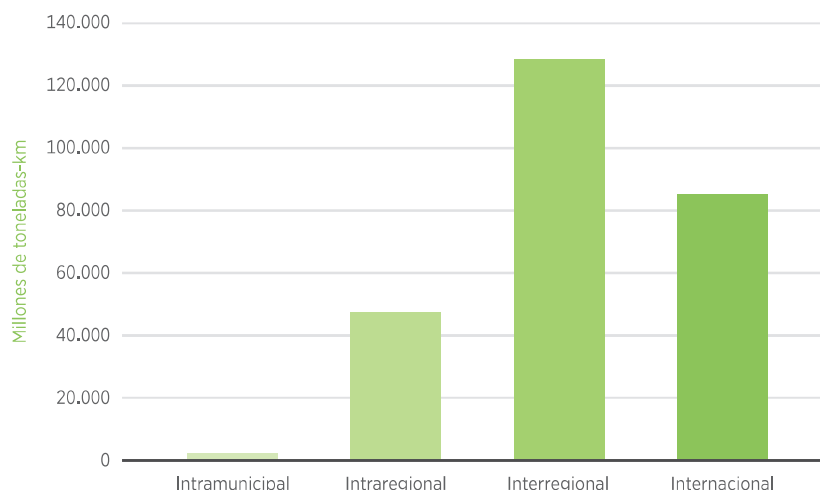


Figura 4.
Millones de toneladas-km transportadas en España (2023)

Fuente: elaboración propia a partir de (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024).



Como vemos en las figuras 2 y 4, si bien el transporte de larga distancia (interregional e internacional) solo concentra el 29 % de las toneladas transportadas, cuando entra en la ecuación la distancia de transporte, estos dos ámbitos producen más del 81 % de las toneladas-km. Dado que el consumo energético y las emisiones de GEI están relacionadas no solo con el número de toneladas transportadas sino también con la distancia de transporte, las toneladas-km nos proporciona información sobre las operaciones que más peso tienen para la descarbonización del sector.

Podemos concluir que el transporte de mercancías en España concentra la mayoría de las operaciones en los ámbitos de corta y media distancia (intra-municipal e intra-regional), sin embargo, la mayoría de la producción de toneladas-km se producen en el ámbito interregional, de donde podemos intuir el origen del consumo energético y de las emisiones relacionadas con el sector. Esta consideración es relevante en tanto que los rangos de autonomía de las tecnologías condicionan hoy en día el uso de las mismas. Así, una muy alta porción de las toneladas podrían ser transportadas con alternativas que aun tengan una autonomía limitada por la existencia de infraestructura, dadas las distancias cortas en las que se transportan. Sin embargo, aunque el número de operaciones es pequeño, las operaciones de larga distancia concentran una buena parte del uso energético, por lo que el despliegue de una infraestructura pública es crucial.

En cuanto a la tecnología utilizada hoy en día en España, el 98 % de los vehículos continúan siendo propulsados por diésel, 1 % por gasolina, y el 1 % restante es la suma del resto de tecnologías. Entre los vehículos de propulsión alternativa destacan los camiones de gas natural comprimido, de gas licuado del petróleo, y eléctricos (DGT, 2024). Vehículos registrados para consumir biocombustibles y biometano son todavía anecdóticos, y el hidrógeno suma hoy en día 8 camiones. Sin embargo, vemos cómo la mayoría de camiones eléctricos se concentran en los de menor carga útil (inferior a 5 toneladas), mientras los de GNC y GLP se concentran entre los segmentos más pesados.

Tabla 1. Parque de vehículos pesados de transporte de mercancías en España (2023)

	CARGA ÚTIL				
Etiquetas de fila	3.000-4.999 Kg	5.000-6.999 Kg	7.000-9.999 Kg	Más de 9.999 Kg	TOTAL
Biodiesel				2	2
Biometano	1				1
Butano	5		4	1	10
Diésel	78.526	48.136	70.040	109.140	305.842
Eléctrico	274	39	82	122	517
Gas Licuado de Petróleo	125	83	67	60	335
Gas Natural Comprimido	742	511	868	1.314	3.435
Gas Natural Licuado	4	17	49	147	217
Gasolina	841	413	560	795	2.609
Hidrógeno		6		2	8

Elaboración propia a partir de Microdatos (DGT, 2024)

Es posible observar cómo la situación de partida es un verdadero reto, cuando los objetivos de reducción de emisiones para el sector transporte son realmente ambiciosos tanto a medio como a largo plazo. El Pacto Verde Europeo, al igual que el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), han marcado el objetivo de reducción de emisiones derivadas del sector transporte en un 90 % para 2050. En el corto y medio plazo, el PNIEC define objetivos intermedios de reducción: 34 % en 2030 sobre las emisiones registradas en 2022, y 60 % en 2040.

Para impulsar la transición del sector a través de sus diferentes segmentos, la regulación comunitaria y nacional tienen como objetivos a los diferentes actores: fabricantes de vehículos, suministradores de combustible, y usuarios finales.

2. Alternativas y palancas para la descarbonización del transporte pesado

Como se ha introducido anteriormente, la competitividad de las diferentes alternativas para la descarbonización del transporte pesado ha sido y continúa siendo sujeto de discusión, por el estado inicial en el que se encuentra el mercado de los vehículos de combustión alternativa, la política de neutralidad tecnológica adoptada por la Comisión, y el amplio abanico de opciones disponibles sobre las que existen todavía numerosas incertidumbres.

2.1. Alternativas tecnológicas

Es importante distinguir entre las motorizaciones disponibles para el transporte pesado por carretera, y los combustibles que cada una de ellas puede utilizar. Como veremos, la descarbonización del transporte es el resultado de la motorización y el combustible utilizados.

Ocho motorizaciones posibles se erigen como principales soluciones tecnológicas a la propulsión de camiones: diésel (compresión), gasolina (ignición), gas natural (ignición, similar al de gasolina), gas natural HDPI (compresión, *High Pressure Direct Injection*), eléctricos de batería, eléctricos de pila de combustible, las motorizaciones híbridas, y los de combustión de hidrógeno. Las motorizaciones de combustión (principalmente diésel, gasolina, y gas) han sido sujeto de sucesivas y exigentes políticas en el pasado, como la Norma EURO desde 1993 (Parlamento y Consejo Europeos, 2009), dirigida a reducir las emisiones de contaminantes del aire producidas por la combustión: material particulado (*PM*, por sus siglas en inglés), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO). Estos contaminantes no solo son dañinos para los ecosistemas que nos rodean y la capa de ozono troposférica, sino también para la salud humana en entornos urbanos donde convivimos con los vehículos pesados.

Gracias al desarrollo tecnológico impulsado por este tipo de políticas y la economía del combustible, los motores han evolucionado hacia una mayor eficiencia y menores emisiones de contaminantes. En los últimos 20 años, el consumo energético por tonelada.km ha descendido en más de un 2,5 % (ODYSSEE-MURE, 2024). Sin embargo, estas tecnologías son hoy en día

maduras y las mejoras en eficiencia energética son cada vez más costosas comparadas con su impacto. Es por ello que es necesario también introducir nuevas tecnologías más eficientes y combustibles que reduzcan las emisiones en uso.

Para ilustrar estas alternativas en la descarbonización, en este capítulo nos centraremos en el segmento de camiones más comúnmente utilizado en Europa, las cabezas tractoras con configuración de ejes 4x2, y un peso bruto del vehículo mayor a 16 toneladas. En la clasificación europea VECTO¹, se denominan grupo «5», y dentro de este grupo tenemos dos subgrupos según el perfil de uso: 5-RD (transporte regional, por sus siglas en inglés, *Regional Delivery*), y 5-LH (transporte de larga distancia, *Long-Haul*). En Europa, durante el período de reporte 2019-2022, más del 60 % de los camiones registrados pertenecían al subgrupo 5-LH, y en España, el 93 % de las toneladas-km transportadas fueron cargadas en vehículos articulados de más de 20 toneladas de carga útil (pertenecientes a este mismo grupo)².

Para un camión típico 5-LH, la potencia media registrada en la Unión Europea es de unos 350 kW, equivalentes a unos 500 caballos de fuerza. Para estas motorizaciones, se reportan consumos medios de 12,1 MJ/v.km (34 litros/100 km) (Prussi *et al.*, 2021) en motorizaciones diésel. Sus homólogos de gas natural por ignición tienen unos consumos específicos parecidos en el caso de los motores HDPI de compresión, o ligeramente superiores (en torno a 14,6 MJ/v.km, +21 %) por características propias del ciclo de combustión de cada tipo de motor. Sin embargo, es importante remarcar que, dado que el gas natural (fósil) tiene unas menores emisiones de CO₂ por contenido energético, las emisiones específicas de los vehículos de diésel y gas natural están muy igualadas. Entre los datos recolectados por la Comisión, las emisiones de CO₂ específicas (medidas en gCO₂/v.km) para los camiones de gas natural (del subgrupo 5-LH) eran en torno al 9 % inferiores a sus homólogos diésel (EEA, 2024). Por último, las motorizaciones híbridas tienen unos consumos medios alrededor del 8 % inferiores a los vehículos puramente propulsados por el motor de combustión.

Sin embargo, las nuevas tecnologías basadas en motorizaciones eléctricas reportan consumos específicos significativamente inferiores, entre 4,6 MJ/v.km para los eléctricos de batería, y 9,5 MJ/v.km (ICCT, 2023) para los eléctricos de pila de combustible. Cabe remarcar que se esperan mejoras tecnológicas tanto en las tecnologías alternativas como en las más maduras, pero a diferentes ritmos.

En este punto, es importante aclarar qué tipos de combustibles pueden utilizar cada una de las motorizaciones. Los motores diésel, los más numerosos, pueden ser propulsados por diésel fósil (con una porción de diésel renovable), o con combustibles líquidos renovables compatibles con la Normativa EN 15940. Entre los combustibles renovables compatibles con la motorización diésel destaca el HVO (*Hydrogenated Vegetable Oil*), un biocombustible elaborado a partir de hidrotratamiento de aceites. Se diferencia del biodiésel convencional mezclado en el diésel fósil

¹ VECTO es la herramienta de simulación utilizada por la Comisión Europea para determinar consumos y emisiones de cada configuración de vehículo pesado vendida en Europa. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/vehicle-energy-consumption-calculation-tool-vecto_en

² La clasificación de vehículos en la *Encuesta permanente de transporte de mercancías por carretera* no recoge la clasificación europea de grupos VECTO. Sin embargo, el 100 % de los vehículos de más de 20 toneladas de carga útil matriculados en España entre 2019-2022 pertenecen al grupo 5-LH según el dataset de matriculaciones de la EEA (2024).

(*FAME, Fatty Acid Methyl Ester*) en el proceso de producción y la forma de uso. El FAME se produce a través de la transesterificación de las grasas, y por su inestabilidad a la oxidación, permite ser mezclado con el diésel fósil en hasta un 20 % de la mezcla³, mientras el HVO puede reemplazar hasta el 100 % de la mezcla. El motor diésel también puede funcionar con combustibles sintéticos elaborados a partir de hidrógeno y carbono por el proceso de Fischer-Tropsch. Para cualquier combustible sintético, su clasificación y reducción de emisiones vendrán determinadas por el origen del hidrógeno principalmente, aunque ciertas restricciones aplican también al carbono. Cuando el hidrógeno proviene de la electrólisis del agua, podemos denominarlo electrocombustible, de los cuales, el electrodiésel es el compatible con este motor.

Los motores de gas natural (bien de ignición o de compresión, HDPI) funcionan con gas natural fósil (metano, CH₄), el cual es totalmente sustituible por cualquier otro tipo de metano. El biometano es su sustituto por excelencia, obtenido a través de la digestión anaerobia de la biomasa, y un posterior proceso de *upgrading* que convierte el biogás en biometano eliminando impurezas. Sin embargo, también puede provenir el metano de un proceso de Fischer-Tropsch, produciendo así un metano sintético o e-metano según el origen del hidrógeno.

Las dos principales motorizaciones alternativas son los vehículos eléctricos de batería, y los vehículos eléctricos de pila de combustible. La principal diferencia entre ellos es la forma de almacenar la energía: en el vehículo eléctrico de batería, la energía se almacena en la propia batería en forma de energía eléctrica, mientras en el vehículo de pila de combustible se almacena en forma de energía química contenida en el hidrógeno. La pila de combustible es el elemento encargado de convertir esta energía química en energía eléctrica, que alimenta a su vez al motor del vehículo, similar al del primero. Adicionalmente, los vehículos de pila de combustible cuentan normalmente también con una batería que hace la función de *buffer*, aportando potencia adicional al motor, además de la propia pila. Como es de esperar, el coste de compra de un vehículo de pila de combustible puede ser superior al de uno de batería por los elementos de su motorización: además del motor eléctrico, la batería, y los componentes de electrónica de potencia, ha de contar con un tanque de hidrógeno y una pila de combustible. Sin embargo, no siempre es así, ya que la batería de un vehículo eléctrico necesita un tamaño mucho mayor (es su único almacenamiento), y dependiendo de la autonomía, ambas tecnologías compiten por ser la más competitiva en precio de compra.

Por último, la motorización de combustión de hidrógeno (H₂ICE, o HICEV) ha sido una de las alternativas propuestas por algunos de los fabricantes en los últimos años. La combustión de hidrógeno tiene unos rendimientos significativamente inferiores al de un vehículo eléctrico y también a los de un vehículo de pila de combustible, ya que los ciclos de combustión tienen mayores pérdidas. Además de la menor eficiencia, los vehículos de combustión de hidrógeno tienen una problemática añadida, y es que necesitan un motor piloto que inicie la combustión. Este motor piloto es de mucho menor tamaño, y sirve únicamente para comenzar el ciclo de combustión, por lo que su consumo es pequeño. Sin embargo, tanto la combustión de

³ El FAME contiene átomos de oxígeno al final del proceso de elaboración, por lo que es más inestable a la oxidación. La molécula de HVO no contiene oxígeno, por lo que es más estable y puede sustituir el total de diésel fósil. Las mezclas de fósil con FAME se denominan comercialmente B7, B10, B20, en función del porcentaje de FAME en ellas.

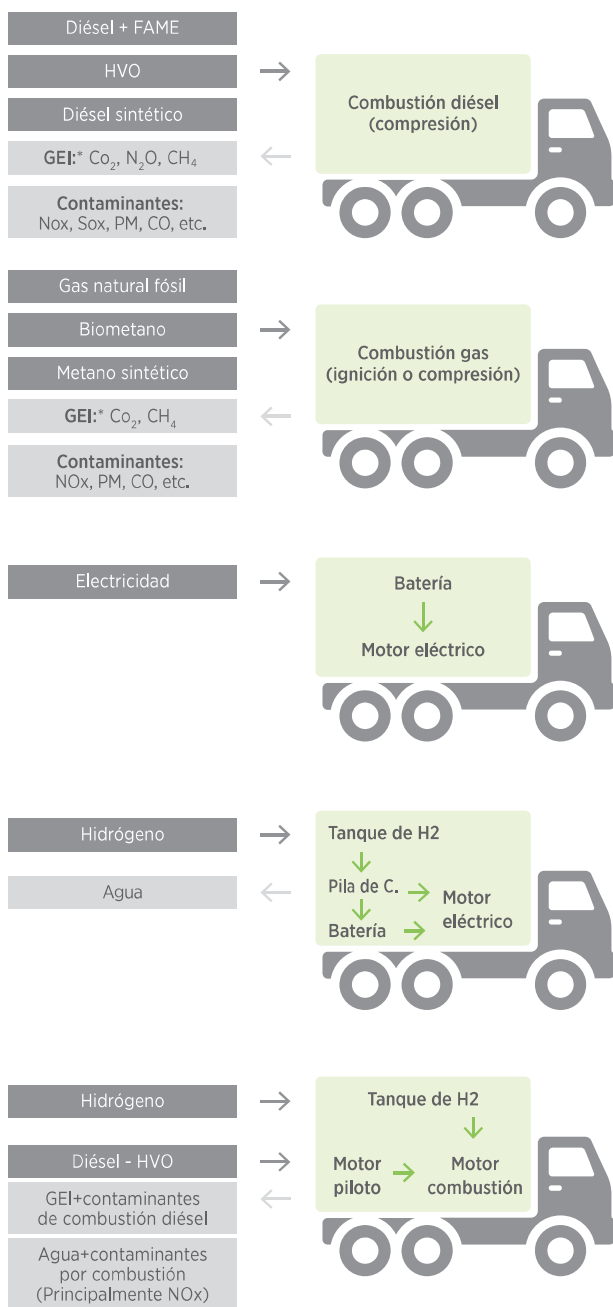
hidrógeno como la combustión de un líquido (diésel o HVO) producen emisiones de óxido de nitrógeno por la temperatura de combustión, además de dióxido de carbono en la combustión del líquido, si bien estas emisiones pueden ser biogénicas. Es por ello que estos vehículos no tienen emisiones nulas, pero por su gran potencial de reducción, sí son considerados «vehículos cero emisiones» en la normativa europea, como veremos más adelante.

Figura 5.

Motorizaciones más comunes de vehículos pesados de transporte de mercancías. Influjos energéticos y emisiones

Fuente: elaboración propia.

* Las emisiones de CO₂ no computan como emisiones de GEI cuando son biogénicas o de captura del aire. Es decir, dependen del origen del combustible.



Como vemos en la figura resumen, hay motorizaciones con varios combustibles posibles, y otras en las que el combustible tiene una sola forma, pero diferentes orígenes.

Una de las principales barreras a la adopción de las tecnologías alternativas (eléctrico de batería, o de pila de combustible, principalmente), es el precio de compra del vehículo (CAPEX). Hoy en día, numerosos estudios sitúan el precio de un camión de larga distancia (5-LH) eléctrico de batería en 2-3 veces el precio de un camión diésel (el precio de compra de un camión diésel está en torno a 150.000 €), y el de uno de pila de combustible en 2-2,5. Sin embargo, para tonelajes más pequeños, por ejemplo, un camión de reparto regional, al necesitar menores autonomías, se vuelve más competitiva la alternativa de batería (1,5 x Diésel) respecto a la de pila de combustible (2x Diésel) (Basma and Rodríguez, 2023).

Sin duda, estos precios de compra del vehículo experimentarán importantes reducciones en el medio plazo, ya que una buena parte del coste son los componentes de almacenamiento (baterías y tanque de hidrógeno), y la pila de combustible, y se esperan unos relevantes descensos en sus costes de producción. Por ejemplo, las baterías de ion-Litio han bajado desde 1.220 \$/kWh en 2010 hasta precios por debajo de 275 \$/kWh en 2020. Según uno de los últimos trabajos que recopila más de doscientas fuentes originales de precios de baterías y pilas de combustibles (Link *et al.*, 2024), el coste de las baterías podría caer entre un 64-75 % antes de 2035, con precios por debajo de los 150 €/kWh. De igual forma, las pilas de combustibles pueden decaer en precio desde 540 €/kW en 2020, hasta precios por debajo de 100 €/kW en 2045 y de 85 €/kW en 2050. Con estas reducciones, la mayoría de segmentos de camiones podrían experimentar igualdad de precios entre el diésel y los eléctricos de pila de combustible antes de 2040. Para los eléctricos de batería, la igualdad en precios se verá más condicionada por las autonomías que necesita cada segmento, llegando antes en aquellos con baterías de menor capacidad.

Cabe remarcar que en el coste de tenencia del vehículo no influye únicamente el precio de compra, sino que influyen una serie de otros costes en los que se incurren durante su uso: energía, mantenimiento, costes fijos (seguros, tasas anuales), etc. La combinación de todos ellos hará más competitiva una alternativa ante las demás, y el resultado estará además condicionado a la disponibilidad de acceso al capital, uso anual del vehículo, y un número de otros factores que conforman el caso de aplicación.

2.2. Combustibles para el transporte pesado

Como decíamos anteriormente, la energía es un coste considerable dentro del uso del vehículo, en torno al 30-40 % en vehículos de combustión, y entre 10-30 % en vehículos de motorización eléctrica (por ser más eficientes). El combustible determina también las emisiones totales en uso del vehículo, en combinación con la eficiencia energética de cada motorización.

Las emisiones de un vehículo han de contabilizarse como las emisiones derivadas de la producción del combustible (*WTT*, *Well-To-Tank*, del pozo al tanque), y aquellas derivadas del uso del combustible dentro del vehículo (*TTW*, *Tank-To-Wheel*, del tanque

a la rueda). En conjunto, las emisiones totales se denominan *WTW* (del pozo a la rueda, *Well-To-Wheel*). A continuación, analizamos como cada opción tiene unas emisiones diferentes en cada etapa.

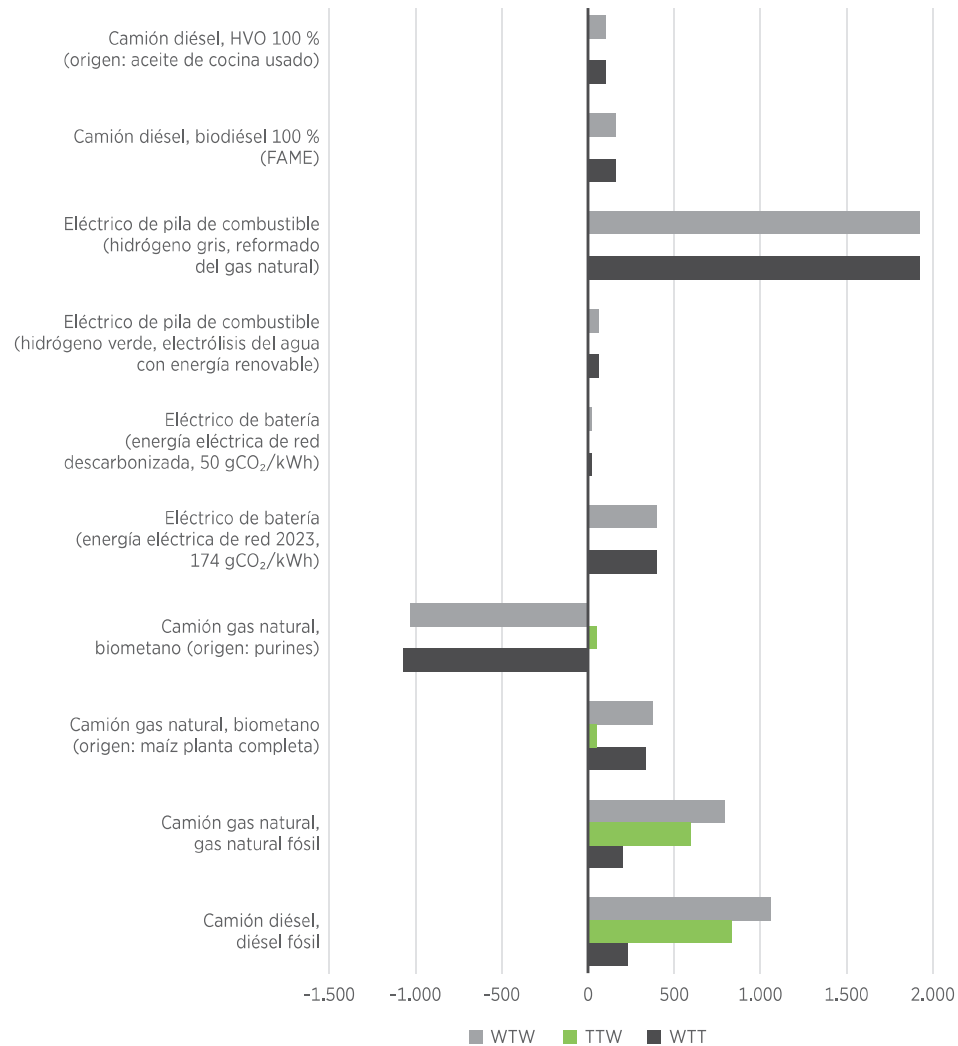
Por ejemplo, los combustibles fósiles de referencia (diésel y gas natural) tienen emisiones tanto en la producción del combustible (por la extracción, transporte, y refinado), como en el uso del combustible, por las emisiones generadas de la combustión en el motor. Sin embargo, todos aquellos combustibles elaborados a partir de biomasa (FAME, HVO, biometano), si bien la combustión produce GEI, se consideran emisiones biogénicas por lo que no son computadas⁴. Tampoco presentan emisiones en tubo de escape (TTW) los camiones eléctricos de batería o de pila de combustible, por no tener ninguna combustión en su motorización.

Si miramos ahora hacia las emisiones en producción del combustible (WTT), todos los combustibles presentan en menor o mayor medida ciertas emisiones. Estos datos, elaborados a partir de los datos de referencia de la Directiva de Energías Renovables (RED III) (European Parliament, 2023a), cuentan con las emisiones derivadas de todo el proceso de producción: cultivo o extracción de la materia prima, emisiones derivadas del cambio de uso del suelo, transformación, transporte, distribución, acumulación de carbono en terreno por prácticas agrarias mejoradas, ahorros de CO₂ por captura y almacenamiento geológico o remplazo. En los combustibles elaborados a partir de biomasa (FAME, HVO, biometano) tendremos emisiones derivadas de todos los anteriores conceptos (excepto si es una materia prima de residuo, en cuyo caso las emisiones de extracción o cultivo son nulas). En la producción de electricidad e hidrógeno tendremos emisiones sobre todo derivadas de la generación de energía eléctrica o producción de hidrógeno, y en su transporte.

Como resultado, destaca el caso de un camión de pila de combustible como ejemplo: en el caso de usar hidrógeno verde, se pueden reducir las emisiones por kilómetro en casi el 100 % (hay unas ciertas emisiones producidas en el transporte del hidrógeno), pero las emisiones pueden prácticamente duplicar las de su homólogo diésel si el hidrógeno utilizado es gris (elaborado a partir del reformado del gas natural fósil). De igual forma, un camión propulsado con biometano puede tener unas emisiones totales (WTW) positivas en el caso de un cultivo energético como es el maíz cuando se usa la planta completa, pero unas emisiones negativas cuando se usan purines, por los créditos que se asignan a la gestión del estiércol. Todos los valores de referencia para los múltiples procesos de producción de los combustibles alternativos se encuentran recogidos en la RED III, para su posterior transposición a la normativa nacional.

⁴ El CO₂ biogénico se origina en la materia orgánica y forma parte del ciclo natural del carbono, en el que las plantas absorben CO₂ mediante la fotosíntesis. Posteriormente, esas plantas se descomponen o se queman, liberando el CO₂ a la atmósfera, desde donde es reabsorbido por nuevas plantas, creando así un proceso circular.

Figura 6. Emisiones WTW de las alternativas tecnológicas y diferentes combustibles en un camión tipo 5-LH



Fuente: elaboración propia a partir de European Parliament (2023a).

En resumen, es importante recordar que para hablar de la descarbonización del transporte pesado se ha de contar siempre con el combustible utilizado y el origen del mismo, ya que es éste quien determina las emisiones finales en uso (WTW), si bien la eficiencia energética de cada motorización es la que determina el consumo (y por tanto, las emisiones) por kilómetro.

3. La regulación para la descarbonización del transporte pesado

Con el fin de impulsar la transición hacia una economía descarbonizada, la regulación europea afecta a los diferentes actores del sector transporte pesado, alineando objetivos. Esta regulación se ha de transponer o aplicar en cada uno de los Estados Miembros, con ciertas licencias en cuanto a la forma de aplicación, pero con objetivos claros de reducción de emisiones.

Podemos dividir las diferentes piezas regulatorias en función del sujeto afectado por ellas:

Fabricantes de vehículos pesados	Suministradores de combustible	Usuario final (transportistas)	Estado Miembro
Reglamento sobre Estándares de Emisiones de CO ₂ de vehículos pesados.	Directiva de Energías Renovables (RED II y RED III). Comercio de derechos de emisión de la UE para edificios, transporte por carretera y otros sectores (Directiva ETS II).	No existen actualmente piezas regulatorias que hagan al usuario final sujeto obligado de cumplimiento.	Reglamento relativo a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos (AFIR).

3.1. Reglamento sobre Estándares de Emisiones de CO₂ de vehículos pesados

En 2023, la Comisión propuso una revisión del Reglamento sobre Estándares de Emisiones de CO₂ de vehículos pesados (Parlamento y Consejo Europeos, 2024), más ambiciosos que los adoptados en el Reglamento 2019/1242: se incluye un mayor número de grupos de vehículos, los objetivos de reducción de emisiones son más restrictivos, y se actualiza la forma de monitorización e informe de las emisiones. El Consejo Europeo aprobó el Reglamento en mayo de 2024, y se traspuso al diario de la Unión en junio de 2024.

En esta revisión del Reglamento se han incluido un mayor número de vehículos a los afectados por la regulación: anteriormente se incluían los vehículos pesados de los grupos VECTO 4,5,9, y 10 (causantes del 73 % de las emisiones GEI en la Unión). En la revisión, se han incluido también los camiones pesados con configuraciones especiales (grupos 11, 12, y 16), los camiones medios (grupos 53, 54, 1, 2, y 3), los autobuses (grupo 32), autocares (grupo 34), remolques y semirremolques (varios grupos). También se incluyen en esta revisión los vehículos profesionales (camiones de basura, volquetes, hormigoneras, etc.), asimilándolos al grupo VECTO al que pertenezcan por peso y configuración, con la salvedad de que el Reglamento les aplicará únicamente a partir de 2035.

Para todos los grupos de camiones anteriormente mencionados, excepto los vehículos profesionales, se establece una senda de reducción de emisiones descendiente desde el 15 % en 2025 hasta el 90 % en 2040. Para los autobuses urbanos (no autocares), la senda es menos gradual, con un 90 % de reducción en 2030 y un 100 % en 2035. Los remolques y semirremolques se mantienen con un objetivo de reducción del 8 % y del 10 %, respectivamente.

Figura 7.

Objetivos de reducción de emisiones del parque nuevo vendido en Europa

Fuente: elaboración propia a partir del Reglamento sobre Estándares de Emisiones de CO₂ de vehículos pesados.



La reducción de emisiones se reporta para cada fabricante, y de forma separada para cuatro subgrupos de vehículos que distinguen entre el transporte de mercancías y personas. Es decir, un fabricante no podrá, por ejemplo, beneficiarse de una reducción de emisiones extra en los autobuses para compensar una falta de reducción de emisiones en los camiones. Las emisiones específicas de un vehículo se calculan, como se indicaba anteriormente, a través de la herramienta VECTO, y sometiéndolo virtualmente a unos perfiles de uso que dependen del grupo al que pertenecen. Por ejemplo, un vehículo 5-LH, según el Reglamento, recorre el 10 % de la distancia en el ámbito regional, y un 90 % en el ámbito interregional, en cada uno de ellos con una carga diferente. La ponderación de todos los kilómetros simulados en los vehículos de este grupo (definido en 116.000 km anuales) resultarán en unas emisiones medias por tonelada/km. Cada fabricante irá reportando estas emisiones para cada vehículo vendido, ya que cada vehículo tiene una configuración expresamente diseñada para el cliente, a diferencia de los vehículos ligeros.

Al final del período de reporte, el fabricante tendría que haber reportado una reducción de emisiones correspondiente a la senda anteriormente descrita, en comparación con el valor de referencia anterior. Algunos de los mecanismos propios de este Reglamento incluyen los incentivos a los vehículos cero y bajas emisiones. Se definen como vehículos cero-emisiones aquellos sin motor de combustión que produzcan menos de 3 gCO₂/t.km, o aquellos con motor de combustión que produzcan menos de 1 gCO₂/kWh, dejando así dentro a los motores de combustión de hidrógeno (que producen menos de 1 gCO₂/kWh). Los vehículos de bajas emisiones se definen como aquellos que no son cero-emisiones pero sus emisiones específicas son inferiores a la mitad de la referencia de su subgrupo. Hasta 2025, los vehículos de bajas y cero-emisiones ponderarán entre 1-2 veces su valor según la reducción respecto a la referencia (cero-emisiones pondera doble). Entre 2025-2030 se traslada este incentivo al exceso de ventas de vehículos de este tipo respecto al 2 % establecido como benchmark. Es decir, si un fabricante vende un 3 % de vehículos cero o bajas emisiones, será compensado en una reducción del 1 % en su objetivo específico, limitado a una reducción total del -3 % del objetivo en el período de reporte. Se permite además la transferencia de vehículos entre fabricantes (a la hora de reportar) siempre que sean vehículos cero-emisiones.

Una de las principales discusiones alrededor de este Reglamento es la contribución de los biocombustibles y gases renovables en la descarbonización del transporte pesado. A la hora de vender un vehículo, un fabricante habrá de reportar un vehículo de motorización diésel como tal, sin importar el combustible que finalmente utilice (podría utilizar HVO o e-diésel, por ejemplo, reduciendo las emisiones WTW). Es por ello que múltiples fabricantes y proveedores de combustibles renovables están en contra de esta posición del Reglamento, ya que el incentivo queda focalizado entonces en la venta de vehículos cero emisiones. Se propuso en su día un *Carbon Correction Factor (CCF)* que sería un factor de corrección a las emisiones medias de un vehículo de combustión, teniendo en cuenta la porción de combustibles renovables en las mezclas europeas, pero esta propuesta ha quedado fuera del texto aprobado. Sí ha quedado dentro del texto el Artículo 15, en el que la Comisión se compromete a producir una evaluación de impacto del CCF en los vehículos pesados en 2027.

También han quedado dentro del texto (considerando 17) los combustibles neutros en CO₂, y la necesidad de elaborar un informe al respecto (también dentro del Art. 15). Para poder introducir estos combustibles neutros (probablemente electrocombustibles), la Comisión deberá evaluar una metodología de matriculación de vehículos que asegure el uso de combustibles neutros en su ciclo de vida. Son numerosas las voces en contra, por la facilidad de manipulación entre moléculas equivalentes para una misma motorización.

3.2. Directiva de Renovables (RED III)

Las energías renovables se presentan como opciones sostenibles frente a los combustibles fósiles, ayudando a reducir las emisiones de gases responsables del cambio climático, diversificar las fuentes energéticas y disminuir la dependencia de los mercados

de combustibles tradicionales. En Europa, las normativas para fomentar estas energías han experimentado importantes avances en los últimos quince años. En 2018, los líderes de la Unión Europea establecieron un objetivo del 32 % de participación de fuentes renovables en el consumo energético final para el año 2030 (RED II). Más recientemente, en marzo de 2023 (RED III), y en línea con el compromiso de alcanzar la neutralidad climática en 2050, se acordó elevar esta meta al 42,5 %, con vistas a llegar al 45 %. La Directiva de Energías Renovables fue adoptada por el Parlamento Europeo el 12 de septiembre de 2023, y por el Consejo el 9 de octubre de 2023. La Directiva modifica la Directiva 2018/2001, el Reglamento 2018/1999 y la Directiva 98/70/EC.

En el ámbito del transporte, la Directiva RED III permite elegir a los Estados Miembros entre dos esquemas alternativos:

- Un objetivo vinculante de una reducción del 14,5 % en la intensidad de emisiones en el transporte gracias a las renovables en comparación con un baseline fijado.
- Un objetivo vinculante de al menos 29 % de renovables (bios, biogás, RFNBOs, también incluyendo bunker internacional) en el consumo final de energía en el transporte.

Los sujetos obligados a cumplir estos esquemas serán los suministradores de combustibles (en España, sólo están dentro de la obligatoriedad los suministradores de productos petrolíferos). Aquellos suministradores de gases para el transporte (tanto fósil como renovables), podrán entrar en el esquema de obligatoriedad, o acogerse a sistemas de certificación y mercado establecidos con este fin, en el que podrían vender sus certificados a los sujetos obligados. Esta segunda opción es de obligatoria implementación también para aquellos suministradores de electricidad para el transporte según la Directiva.

Algunos de los países que ya han transpuesto esta Directiva son Alemania, Austria, Francia, Italia, Portugal, o los Países Bajos. Tomando el caso de Alemania, cuyo esquema vigente es por reducción de factor de emisiones y no por cuota de renovables, ha establecido un mercado de certificados llamado THG (*Treibhausgasquote*) (ZOLL, 2024). En este mercado, cualquier suministrador de combustibles para el transporte (incluyendo electricidad, hidrógeno, gases renovables, etc.) puede vender sus certificados de reducción de emisiones (medidos en tCO₂e) a los sujetos obligados.

Además del objetivo general de reducción del factor de emisiones, o de la cuota de renovables introducida, se establecen unos ciertos límites intermedios a los diferentes combustibles que pueden participar. Para ello, se pueden distinguir diferentes tipos de combustibles en la regulación, de forma simplificada:

Combustible	Origen de la materia prima	Algunas moléculas posibles
Biocombustibles sostenibles de primera generación (no avanzados)	Cultivos alimentarios y forrajeros (palma, colza, caña de azúcar, maíz, cereales, etc.).	Bioetanol, HVO, FAME, Biodiésel, Metanol, Biometano, Amoniac
Biocombustibles sostenibles de segunda generación (no avanzados)	Residuos orgánicos comprendidos en el Anexo IX, Parte B.	Bioetanol, HVO, FAME, Biodiésel, Metanol, Biometano, Amoniac
Biocombustibles sostenibles de segunda generación (avanzados)	Residuos orgánicos comprendidos en el Anexo IX, Parte A.	Bioetanol, HVO, FAME, Biodiésel, Metanol, Biometano, Amoniac
RFNBO (<i>Renewable Fuels of Non-Biological Origin</i>)	Hidrógeno de electrólisis a partir de electricidad renovable (según R.D. (EU) 2023/1184), y CO ₂ que puede ser de captura del aire, biogénico, o fósil de captura (este último, solo hasta 2040).	Hidrógeno, metanol, amoniac, electrocombustibles
RCF (<i>Recycled-Carbon Fuels</i>)	Hidrógeno como subproducto industrial o a partir de la pirólisis de residuos no aprovechables, y CO ₂ que puede ser de captura del aire, biogénico, o fósil de captura (este último, solo hasta 2040).	Hidrógeno, metanol, amoniac, combustibles sintéticos RCF

Como vemos en la tabla, un mismo combustible, por ejemplo, el biometano, puede clasificarse como diferentes categorías regulatorias en función del origen de la materia prima, este es el mensaje principal de la Directiva. Y es en función del origen de la materia prima y del proceso de producción que se le atribuirán unas emisiones determinadas a la hora de computar para los objetivos de reducción de emisiones (tal y como se describía en el subcapítulo anterior).

El Reglamento, con el fin de conducir la descarbonización del transporte prescindiendo en la medida de lo posible de los combustibles con mayor impacto medioambiental, limita el uso de los biocombustibles de primera generación a un 1 % superior a la cuota utilizada en 2020, con un límite del 7 % (en España, el límite es del 7 %). Limita también los de segunda generación no avanzados al 1,7 %, pero impulsa los avanzados a una cuota mínima del 5,5 % (compartida con los RFNBO). Los RFNBO, además de compartir cuota mínima, han de representar más del 1 %. Finalmente, no existe cuota mínima ni máxima para los RCF, sino que serán los Estados Miembros quienes la definan en su trasposición.

En España, se traspuso la anterior Directiva (RED II) en la Orden TED/728/2024, de 15 de julio, por la que se desarrolla el mecanismo de fomento de biocarburantes y otros combustibles renovables con fines de transporte. En esta orden se definen diferentes grupos de combustibles en función del origen de la materia prima, tomando el esquema europeo como base, pero imponiendo seis categorías de certificados bajo SICBIOS (plataforma de reporte), en los que la correspondencia no es uno a uno. Los suministradores tienen, según esta Orden, la obligación de aumentar la venta de combustibles renovables hasta el 12 % en 2026, contando con diferentes porciones de los certificados definidos. Hay objetivos globales e

intermedios relativos a cada tipo de certificado, y se establecen unos pagos compensatorios bastante relevantes por el incumplimiento de estos objetivos, equivalentes a 170-180 €/MWh.

Sin lugar a dudas, la Directiva RED III impulsará a los suministradores de combustible a proveer de combustibles renovables al transporte, incluido el transporte pesado. Para ello, se establecerán esquemas de suministro en el que los sujetos obligados bien provean el combustible directamente, o compren los certificados de otras empresas que generen reducciones (puntos de recarga eléctrico, hidrogenas, suministradores de biometano, etc.).

3.3. ETS II

En 2023 se introdujo el ETS2, un nuevo sistema de comercio de emisiones en la Unión Europea, independiente del ETS existente (European Parliament, 2023b). Este sistema, operativo a partir de 2027, abarcará las emisiones de CO₂ provenientes del uso de combustibles en edificios, transporte por carretera y pequeñas industrias no cubiertas por el ETS actual. Su objetivo es reducir las emisiones en estos sectores en un 42 % para 2030 (comparado con 2005) y fomentar inversiones en movilidad sostenible y actuaciones de renovación en edificios.

El ETS2 seguirá el modelo de «cap and trade», regulando principalmente a los proveedores de combustibles, quienes deberán adquirir derechos de emisión en subastas. Parte de los ingresos se destinará al Fondo Social para el Clima, apoyando a hogares vulnerables y pequeñas empresas, mientras que el resto financiará medidas climáticas y sociales en los Estados miembros. El monitoreo de emisiones comenzará en 2025, y las regulaciones para su operación están detalladas en la Directiva ETS. El sistema incluye mecanismos de estabilidad para evitar volatilidad en el mercado y podría retrasarse hasta 2028 si los precios del gas o el petróleo fueran excepcionalmente altos en 2026. Este mecanismo de estabilidad incluye asignaciones extra en el caso de que este mercado superara los 45 €/tCO₂e (limitando así el precio).

Para el sector transporte, la entrada en vigor del esquema ETS II puede suponer incrementos en el precio del combustible fósil (por la obligación de adquirir asignaciones de los proveedores) de hasta unos 0,12 €/litro de diésel mientras se mantenga el límite en precio. Cuando se elimine el límite y este mercado pueda converger en precio con el ETS anterior, el sobrecoste del diésel podría llegar a 1 €/litro.

3.4. AFIR

La normativa de la Unión Europea incluye metas para fomentar el uso de combustibles alternativos en el transporte. En 2014, se adoptó la Directiva sobre Infraestructura para Combustibles Alternativos (AFID) para atender la creciente demanda de estas fuentes de energía. En el marco del paquete «Fit For 55», la Comisión Europea propuso en julio de 2021 el Reglamento sobre Infraestructura para Combustibles Alternativos (AFIR), que sustituirá a la AFID. El AFIR

fue adoptado por el Consejo Europeo y publicado en el Diario Oficial de la Unión Europea el 22 de septiembre de 2023. Entró en vigor el 12 de octubre de 2023.

Según este Reglamento, se deben implantar grupos de recarga en cada sentido de circulación dentro de la red RTE-T⁵. A 2030, se deben tener estaciones de recarga eléctrica cada 60 km dentro de la red RTE-T global, con más de 3.600 kW disponibles, y más de 2 puntos de 350 kW. Existen ciertas excepciones para tramos de la red con densidades inferiores. También se establecen objetivos para los nodos urbanos: en 2030, la potencia agregada en un punto de recarga ha de superar los 1.800 kW, y los 150 kW de forma individual. En los estacionamientos para camiones, han de implementarse 4 puntos de recarga, de mínimo 150 kW.

En cuanto a la infraestructura de hidrógeno, se han de instalar estaciones de repostaje cada 200 km en la red RTE-T básica, con capacidad de suministrar al menos 1 tonelada de H₂/día, y con al menos un punto de repostaje a 700 bar. De nuevo, existen excepciones para tramos con densidades menores. Por último, existen también obligaciones relativas a la infraestructura de repostaje de GNL, ya definidos en la antigua AFID, con una estación cada 400 km.

La obligación de cumplir con estos objetivos de infraestructuras pertenece al Estado Miembro, responsable de trasladar estas obligaciones a los desarrolladores de infraestructuras a través de incentivos, o derivando obligaciones a otros sujetos obligados. Por ejemplo, la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética⁶, establece la obligación a las estaciones de servicios con ventas superiores a los 5 millones de litros anuales, a instalar puntos de recarga con potencias superiores a 150 kW o a 50 kW en función del volumen de ventas. El grupo de estaciones de servicio afectadas superaba las 200. También la RED III, cuando se trasponga incluyendo esquemas de venta de certificados para los suministradores de electricidad al transporte, generará importantes incentivos a la instalación de puntos de recarga pública, con los que estos desarrolladores podrán obtener beneficios vendiéndolos a los sujetos obligados de la Directiva, tal y como ha sucedido en Alemania.

4. Conclusiones

El transporte pesado es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que lo convierte en un sector clave para alcanzar los objetivos climáticos nacionales e internacionales. En España, su relevancia económica, ligada a sectores como el turismo, la construcción, o el sector agroalimentario, hace indispensable reducir su impacto ambiental sin comprometer el desarrollo. Sin embargo, descarbonizar este segmento enfrenta desafíos particulares, dado que los vehículos pesados requieren mayores niveles de potencia y autonomía, dificultando la adopción de tecnologías como la electrificación, que ya es viable en el transporte ligero.

⁵ La Red RTE-T (Red Europea de Transporte Transeuropea) es una iniciativa de la UE para establecer una red de transporte integrada en toda Europa. La Red RTE-T básica se centra en las conexiones principales entre países de la UE, mientras que la Red RTE-T global es una red más amplia.

⁶ Disponible en: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-8447

Entre las soluciones tecnológicas emergentes se destacan los vehículos eléctricos de batería y de pila de combustible, así como las opciones basadas en combustibles renovables. Si bien ofrecen alternativas prometedoras para reducir las emisiones, aunque su implementación depende de superar barreras como los altos costes iniciales y la limitada infraestructura. Mientras tanto, los combustibles fósiles tradicionales siguen dominando el mercado, y la transición hacia opciones más sostenibles requiere un cambio significativo en los modelos energéticos y tecnológicos actuales.

La regulación juega un papel crucial en esta transición. Normativas como el Reglamento sobre Estándares de Emisiones de CO₂ y la Directiva de Energías Renovables (RED III) establecen objetivos ambiciosos para promover tecnologías y combustibles sostenibles. El Reglamento sobre Infraestructura de Recarga de Combustibles Alternativos (AFIR) también incentivan el desarrollo de infraestructura para combustibles alternativos, como estaciones de recarga eléctrica y de hidrógeno. Sin embargo, persisten debates sobre cómo equilibrar los incentivos entre tecnologías emergentes y la utilización de motorizaciones convencionales con combustibles alternativos, asegurando una transición justa y efectiva.

De cara al futuro, se espera que las mejoras tecnológicas y la reducción de costes en baterías, pilas de combustible y almacenamiento de energía aceleren la adopción de estas soluciones. Esto, junto con el fortalecimiento de la infraestructura y un marco regulatorio sólido, permitirá una descarbonización efectiva del transporte pesado. La clave estará en implementar soluciones adaptadas a las necesidades específicas de cada segmento del transporte, garantizando que el cambio sea viable tanto técnica como económicamente para todos los actores involucrados.

Referencias bibliográficas

- Basma, H.; Rodríguez, F. (2023): *A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe*. Icct. Disponible en: <https://theicct.org/publication/total-cost-ownership-trucks-europe-nov23/>
- DGT (2024): *Microdatos de parque de vehículos (anual)*. Disponible en: <https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/Microdatos-de-parque-de-vehiculos-anual/>
- DNV (2024): *Maritime Forecast to 2050*. DNV. Disponible en: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast/>
- EEA (2024): *Monitoring of CO₂ emissions from heavy-duty vehicles - Regulation (EU) 2018/956*. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/c52f7b51-c1cf-43e5-9a66-3eea19f6385a>
- European Environment Agency (2024): *National emissions reported to the UNFCCC and to the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism*. Disponible en: <https://doi.org/10.2909/6331F651-8863-4656-A911-669F2A332A1E>
- European Parliament (2023a): Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001; Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652.
- European Parliament (2023b): Directive (EU) 2023/959 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union and Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading system (Text with EEA relevance), OJL.
- Eurostat (2024): *GDP and main components (output, expenditure and income)*. Disponible en: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nama_10_gdp/default/table?lang=en
- ICAO (2024): *Conversion processes*. Disponible en: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>
- ICCT (2023): *The European heavy-duty vehicle market until 2040: Analysis of decarbonization pathways*. Disponible en: <https://theicct.org/publication/hdv-europe-decarb-costs-jan23/>
- IEA (2024): *World Energy Outlook 2024*. IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- International Transport Forum (2023): «How governments can bring low-emission trucks to our roads – and fast»; en *International Transport Forum Policy Papers*, 127. Disponible en: <https://doi.org/10.1787/80680242-en>

- Lagouvardou, S.; Lagemann, B.; Psaraftis, H.N.; Lindstad, E.; Erikstad, S.O. (2023): «Marginal abatement cost of alternative marine fuels and the role of market-based measures»; en *Nat. Energy*, 8, 1209-1220. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01334-4>
- Link, S.; Stephan, A.; Speth, D.; Plötz, P. (2024): «Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification» en *Nat. Energy*, 9, 1032-1039. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01531-9>
- McKinlay, C.J.; Turnock, S.R.; Hudson, D.A. (2021): «Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol?»; en *Int. J. Hydrog. Energy*, 46, 28282-28297. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.066>
- Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible (2024): *Encuesta permanente de transporte de mercancías por carretera. Año 2023*. Disponible en: <https://www.transportes.gob.es/el-ministerio/informacion-estadistica/transporte/transporte-de-mercancias-por-carretera/publicaciones-encuesta-permanente-transporte-mercancias-por-carretera/EPTMC2023>
- ODYSSEE-MURE (2024): *Unit consumption of road transport of goods*. ODYSSEE-MURE Disponible en: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/transport/unit-consumption-road-transport-goods.html>
- Osman, A.I.; Nasr, M.; Lichtfouse, E.; Farghali, M.; Rooney, D.W. (2024): «Hydrogen, ammonia and methanol for marine transportation»; en *Environ. Chem. Lett.* 22, 2151-2158. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01757-9>
- Parlamento y Consejo Europeos (2024): *Regulation - EU - 2024/1610 - EN - EUR-Lex*. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1610/oj/eng>
- Parlamento y Consejo Europeos (2009): Reglamento (CE) 595/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de junio de 2009, relativo a la homologación de los vehículos de motor y los motores en lo concerniente a las emisiones de los vehículos pesados (Euro VI) y al acceso a la información sobre reparación y mantenimiento de vehículos y por el que se modifica el Reglamento (CE) n o 715/2007 y la Directiva 2007/46/CE y se derogan las Directivas 80/1269/CEE, 2005/55/CE y 2005/78/CE (Texto pertinente a efectos del EEE), OJ L.
- Plötz, P. (2022): «Hydrogen technology is unlikely to play a major role in sustainable road transport»; en *Nat. Electron*, 5, 8-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00706-6>
- Prussi, M.; Julea, A.; Lonza, L.; Thiel, C. (2021): «Biomethane as alternative fuel for the EU road sector: analysis of existing and planned infrastructure»; en *Energy Strategy*, 33, 100612. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100612>
- Schmidt, P.R.; Weindorf, W.; Failer, S.; Astono, Y.; Ullmann, A. (2023): *Techno-Economics of PtL and PtH2*. LBST.

Xing, H.; Stuart, C.; Spence, S.; Chen, H. (2021): *Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050*. J. Clean. Prod. 297, 126651.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126651>

ZOLL (2024): *Zoll online - Treibhausgasquote (THG-Quote)*. Disponible en: https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/Treibhausgasquote-THG-Quote/treibhausgasquote_thg_quote_node.html