

RESUMEN EJECUTIVO

Hidrógeno como vector para la movilidad terrestre:

Tecnologías, mercado y
retos para su despliegue

ELABORADO POR:



CON EL RESPALDO DE:



Hidrógeno como vector para la movilidad terrestre:

tecnologías, mercado y retos para su despliegue

La descarbonización del transporte por carretera exige una **combinación de soluciones tecnológicas capaces de adaptarse a realidades operativas** muy distintas. En este contexto, el hidrógeno verde se perfila como un vector energético con capacidad para desempeñar un papel relevante, especialmente en aquellos segmentos donde la electrificación directa mediante baterías presenta limitaciones técnicas, económicas u operativas. **Su mayor potencial se concentra en aplicaciones** asociadas a tiempos de repostaje reducidos y necesidad de elevada autonomía, como el **transporte pesado de larga distancia, autobuses, flotas cautivas, maquinaria y aplicaciones off-road**, donde además se precisa de una relación favorable entre el volumen ocupado a bordo y la energía útil almacenada por el sistema.

Las **dos principales vías tecnológicas** para su aplicación son las **pilas de combustible y los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno (H₂-ICE)**. Las primeras destacan por su alta eficiencia y la ausencia de emisiones locales, mientras que los motores H₂-ICE ofrecen una alternativa complementaria en aquellos usos donde la robustez mecánica, el menor coste inicial o el aprovechamiento de plataformas existentes pueden facilitar una implantación más rápida.

A ello se suman dos elementos decisivos para su competitividad: el almacenamiento a bordo y la infraestructura de repostaje. El **almacenamiento gaseoso a alta presión es hoy la solución más madura, mientras que el hidrógeno líquido gana interés en aplicaciones de largo recorrido**, por su mayor densidad energética. En paralelo, el desarrollo del mercado dependerá de la capacidad de coordinar vehículo, suministro, infraestructura y coste del hidrógeno renovable, en un contexto en el que el mayor dinamismo se concentra en camiones, autobuses, flotas intensivas y otras aplicaciones difíciles de electrificar.

Este resumen ejecutivo recoge las principales conclusiones del informe elaborado por el Observatorio Tecnológico del Hidrógeno, y en concreto por sus socios: **Bosch, CIDAUT (Fundación para la Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía), Fundación CIRCE, CMT - Clean Mobility and Thermofluids de la Universitat Politècnica de València, Enagás, Inetum, Linde y la Universidad de Barcelona**. El informe está **respaldado por Gasnam-Neutral Transport**.

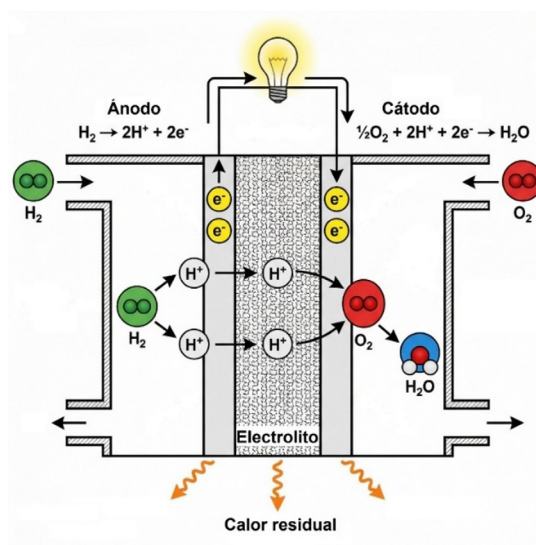


ACCEDE AL INFORME COMPLETO

Pilas de combustible y motores de combustión interna (H₂-ICE), tecnologías predominantes para el uso del hidrógeno en automoción

En movilidad terrestre, la **pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)** es actualmente la opción dominante. Permite una **integración eficaz en arquitecturas de propulsión eléctrica, con rapidez de arranque, buena densidad de potencia y funcionamiento sin emisiones contaminantes** en el punto de uso. A diferencia de los sistemas de combustión, la pila no requiere una etapa térmica intermedia, lo que evita las limitaciones termodinámicas de los motores convencionales y favorece una mayor eficiencia energética.

Principio de funcionamiento de una pila de combustible



FUENTE: Elaboración propia.

Frente a esta ruta, los **motores H₂-ICE** representan una alternativa de gran interés para determinadas aplicaciones. Aunque su eficiencia es inferior a la de las pilas de combustible en gran parte del rango de operación y pueden generar emisiones de NO_x (controlables mediante estrategias de combustión y postratamiento), el ICE pudiera tener una mayor eficiencia en grados de carga altos. Su principal atractivo es industrial: **permiten aprovechar parte de las cadenas de suministro, capacidades de fabricación y conocimiento acumulado en motores de combustión interna**, reduciendo tiempos de desarrollo y parte del CAPEX inicial.

Deben distinguirse diferentes tipologías en función del sistema de encendido y del diseño original del motor:

► Según el sistema de encendido

- Motores de encendido provocado (MEP/SIE, Spark Ignition Engines):
 - Inyección indirecta, multipunto (PFI, Port Fuel Injection)
 - Inyección directa (DI, Direct Injection)
- Motores de encendido por compresión (dual-fuel o H₂-CI)

► Según el diseño original del motor

- Motores dedicados de hidrógeno
- Motores adaptados o retrofitting

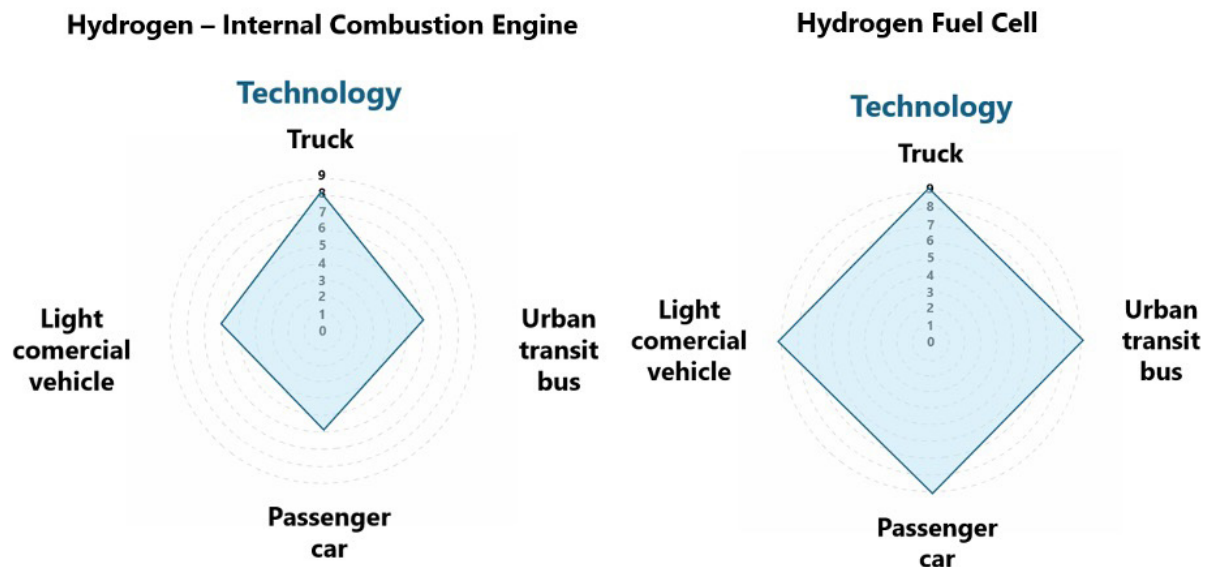
Comparativa entre las tecnologías de propulsión

Tecnología	Estado actual	TRL	Puntos fuertes	Debilidades	Tendencias de desarrollo
Pilas de combustible (FC, principalmente PEMFC)	Comercial / plenamente probada en entorno operativo	9	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia Cero emisiones locales Alta densidad de potencia Buena integración en propulsión eléctrica 	<ul style="list-style-type: none"> Coste inicial elevado Uso de catalizadores basados en platino Alta pureza del H2 requerida Competitividad condicionada por infraestructura y coste del H2 	<ul style="list-style-type: none"> Consolidación en transporte pesado y flotas Evolución de materiales y membranas Desarrollo de alternativas como AEM Reducción progresiva del uso de catalizadores críticos
Motores de combustión interna (H2-ICE)	Despliegue temprano / Validación comercial avanzada	Hasta 8 (máximo observado en camiones)	<ul style="list-style-type: none"> Aprovechamiento de plataformas existentes Menor CAPEX inicial Robustez mecánica Menor pureza requerida del H2 Rápida implementación 	<ul style="list-style-type: none"> Menor eficiencia que FC Emisiones de NO_x controlables pero presentes Necesidad de componentes específicos 	<ul style="list-style-type: none"> Avance hacia diseños dedicados a H₂ Mejora del control de combustión y emisiones Foco en camión pesado, maquinaria y usos off-road

FUENTE: Elaboración propia con datos a abril 2026.

En referencia a los **niveles de madurez tecnológica** de las tecnologías de propulsión, los **motores de combustión interna presentan diferentes niveles según el vehículo, con el motor de los camiones en el máximo nivel (TRL 8)**; mientras que la tecnología de **pila de combustible** presenta un **nivel de madurez homogéneo** entre los distintos tipos de vehículo analizados, situándose en un **TRL 9**.

Nivel de madurez de las distintas tecnologías



FUENTE: International Energy Agency, 2026.

Sistemas de almacenamiento de hidrógeno en vehículos

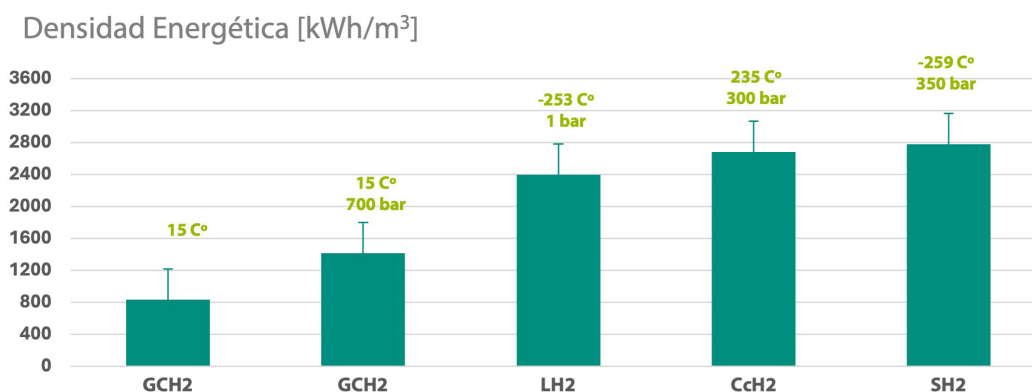
A diferencia de los combustibles líquidos convencionales, el hidrógeno presenta una **baja densidad energética volumétrica en condiciones ambientales**, lo que obliga a recurrir a soluciones tecnológicas específicas para utilizarlo en automoción. En la actualidad, el **almacenamiento gaseoso a alta presión** constituye la solución dominante y comercialmente más viable. En movilidad terrestre, las configuraciones más habituales se sitúan en **350 bar**, especialmente en transporte pesado e industrial, y en **700 bar**, principalmente en vehículos ligeros y con creciente interés para determinadas aplicaciones de mayor autonomía.

La segunda gran vía es el **hidrógeno líquido (LH₂)**, que ofrece una ventaja clara en términos de **densidad energética volumétrica**, lo que lo convierte en una alternativa especialmente atractiva para transporte pesado de largo recorrido. Sin embargo, esta opción exige almacenamiento criogénico, con mayores requisitos técnicos, operativos y económicos.

Existen **otras alternativas emergentes**, las cuales presentan un grado de madurez inferior:

- ▶ Almacenamiento de hidrógeno crio-comprimido
- ▶ Almacenamiento en materiales sólidos

Densidad energética de las distintas formas de almacenamiento del hidrógeno



GCH2: Hidrógeno comprimido LH2: Hidrógeno licuado CcH2: Hidrógeno crio-comprimido SH2: Hidrógeno sólido

FUENTE: Elaboración propia

El éxito de la movilidad con hidrógeno no depende solo de la tecnología de propulsión, sino del denominado **“paquete energético”** completo. Es decir, de la integración coherente entre tecnología de uso del hidrógeno, almacenamiento a bordo y sistema de repostaje.

Comparativa entre los sistemas de almacenamiento de hidrógeno

Tecnología	Estado actual	TRL	Puntos fuertes	Debilidades	Tendencias de desarrollo
Almacenamiento de hidrógeno gaseoso a alta presión (cH2)	Comercial / solución dominante en movilidad terrestre	9	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología más implantada en vehículos de hidrógeno. • Compatible con repostaje rápido. • Uso extendido a 350 bar y 700 bar. • Arquitectura conocida de depósitos, regulación y seguridad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja densidad energética volumétrica frente a combustibles líquidos. • Integración condicionada por seguridad, ventilación, resistencia estructural y crash management. 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimización de diseños multicelda. • Integración estructural de depósitos. • Evolución hacia soluciones de mayor autonomía, especialmente con 700 bar.
Almacenamiento de hidrógeno líquido (LH2)	Alternativa emergente para movilidad pesada de largo recorrido	9	<ul style="list-style-type: none"> • Alta densidad energética volumétrica. • Permite reducir el volumen del sistema para una misma energía almacenada. • Potencial para autonomías superiores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad técnica elevada. • Pérdidas por evaporación (boil-off). • Infraestructura de repostaje limitada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora de depósitos criogénicos y gestión del boil-off. • Desarrollo de almacenamiento subenfriado para aumentar densidad y reducir evaporación.
Almacenamiento de hidrógeno crio-comprimido (CcH2)	Tecnología en desarrollo / sin despliegue generalizado en carretera	5	<ul style="list-style-type: none"> • Puede alcanzar densidades superiores al hidrógeno líquido o al comprimido por separado. • Potencial para aumentar la cantidad de hidrógeno almacenada en un volumen dado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor complejidad por combinación de requisitos criogénicos y alta presión. • Ausencia de madurez comercial clara en movilidad terrestre. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora de seguridad, aislamiento e integración vehicular. • Validación técnica de sistemas criogénicos presurizados.
Almacenamiento en materiales sólidos	Fase de desarrollo / adopción limitada en movilidad	5	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial para almacenar hidrógeno en forma más compacta y con menor presión que los sistemas gaseosos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Restricciones relevantes para implantación generalizada en carretera. • Penalizaciones potenciales en masa, integración y dinámica de carga/descarga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de hidruros metálicos, LOHC y materiales adsorbentes. • Reducción de masa del sistema y mejora de cinética de absorción/liberación.

FUENTE: Elaboración propia con datos a abril 2026.



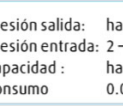

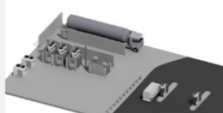







Tecnologías de repostaje de hidrógeno

Las estaciones de repostaje de hidrógeno constituyen el eslabón que **conecta la producción y el acondicionamiento del hidrógeno con su uso final en el vehículo**. Su diseño influye directamente en el tiempo de repostaje, la capacidad de suministro, la eficiencia energética del sistema y la viabilidad económica de las flotas.

Se distinguen **tres grandes configuraciones**:

- ▶ Estaciones de hidrógeno comprimido alimentadas con gas comprimido
- ▶ Estaciones de hidrógeno comprimido alimentadas con hidrógeno líquido
- ▶ Estaciones de hidrógeno líquido "on board"

Arquitecturas de estaciones de repostaje de hidrógeno según estado del combustible

	Estaciones de repostaje de H ₂ gaseoso comprimido (cH ₂)		Estaciones de repostaje de H ₂ líquido a bordo		
	Suministro H ₂ gaseoso - compresor	Suministro H ₂ líquido - bomba	Suministro LH ₂ - bomba sLH ₂		
Equipos de compresión					
	Presión salida: hasta 900 bar Presión entrada: 6 - 180 bar Capacidad: hasta 52 kg/h Consumo: 0.5 - 3.3 kWh/kg	Presión salida: hasta 900 bar Presión entrada: 2 - 2.5 bar Capacidad: hasta 100 kg/h Consumo: 1.3 - 1.5 kWh/kg	Presión salida: hasta 16 bar Presión entrada: 2 - 2.5 bar Capacidad: hasta 500 kg/h Consumo: 0.05 kWh/kg		
Sistemas de repostaje					
Aplicaciones movilidad	 Equipos de almacén	 Vehículos ligeros	 Autobuses	 Camiones	 Trenes

FUENTE: Linde, 2026

La tecnología de estaciones de **hidrógeno comprimido alimentadas con gas comprimido es la más implantada** en movilidad por carretera, tanto para vehículos ligeros como para aplicaciones pesadas.

Las estaciones pueden aprovisionarse de hidrógeno mediante producción in-situ (normalmente mediante un electrolizador) o con suministro externo.

En el caso de suministro externo, según las **características del aprovisionamiento** a la estación de repostaje, se pueden dividir en:

- ▶ Estaciones suministradas por hidrógeno comprimido gaseoso a distintas presiones de trabajo a través de baterías de botellas o semitrailers.
- ▶ Estaciones donde el hidrógeno se suministra por tubería.
- ▶ Estaciones suministradas por hidrógeno líquido.

Estación de repostaje de hidrógeno en Barcelona



FUENTE: J.R. Morante

Mercado global de vehículos de hidrógeno e infraestructuras

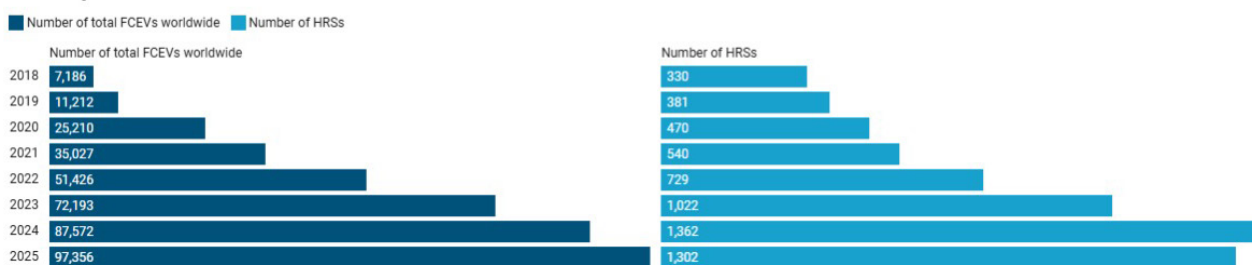
El mercado de la movilidad terrestre basada en hidrógeno se encuentra en una fase de transición entre demostración avanzada y despliegue temprano, con una evolución muy desigual según segmentos.

El mayor dinamismo se concentra en el **transporte pesado**, las **flotas cautivas** y las **aplicaciones off-road**, donde las ventajas operativas del hidrógeno son más claras. Este desarrollo está impulsado por tres factores principales: **presión regulatoria**, **apoyo institucional** e **innovación tecnológica**.

A escala global, el parque se sitúa en torno a **100.000 vehículos de pila de combustible**, mientras que la red mundial supera las **1.302 estaciones de repostaje**.

Desarrollo de los vehículos de pila de combustible y estaciones de repostaje

Development of FCEV and HRS numbers

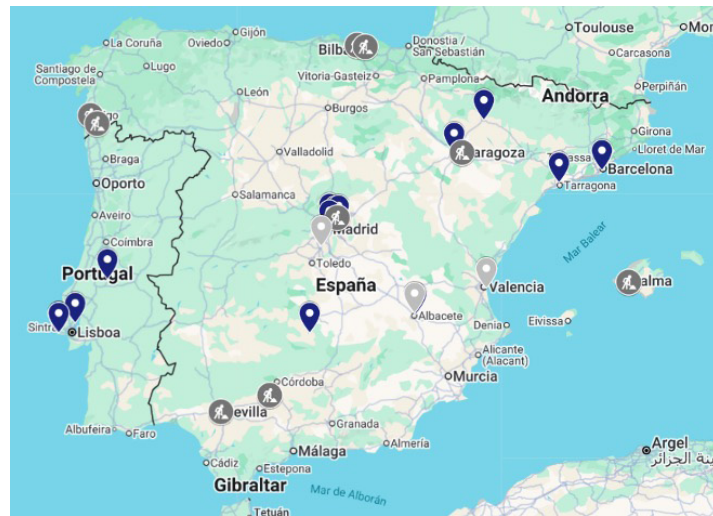


FUENTE: IEA Fuel Cells, Tracking Progress: Growth of Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs) and Hydrogen Infrastructure 2025.

La geografía del mercado está fuertemente concentrada. El **92% de los vehículos** se localiza en **Corea del Sur, China, Estados Unidos y Japón**, lo que confirma que el despliegue sigue dependiendo de entornos con fuerte apoyo institucional e industrial.

En **España**, a finales de 2025 se contabilizaban **74 autobuses** y **45 vehículos ligeros** de pila de combustible. Además, contaba con **11 puntos de repostaje** de hidrógeno privadas y 3 puntos de repostaje para carretillas y material handling; y se estiman unas 6 nuevas estaciones de repostaje en construcción de próxima apertura.

Estaciones de repostaje de hidrógeno en España



FUENTE: Gasnam-Neutral Transport

En **vehículos ligeros**, el hidrógeno mantiene visibilidad, pero su madurez comercial sigue siendo limitada. El crecimiento del segmento está muy condicionado por la competencia del vehículo eléctrico de batería, que cuenta con mayor penetración, más infraestructura y economías de escala más avanzadas.

Aun así, el vehículo ligero de hidrógeno conserva cierto interés en nichos concretos, como taxis o flotas intensivas, donde el **tiempo de repostaje** y la **alta disponibilidad operativa** pueden aportar una ventaja frente a otras tecnologías.

El mayor potencial del mercado se desplaza con claridad hacia el transporte pesado y de mercancías. En este ámbito, el hidrógeno ofrece un mejor encaje por su elevada autonomía, rapidez de repostaje y alta utilización del vehículo.

La evolución del mercado puede entenderse en **tres horizontes**:

- ▶ A **corto plazo** (0-5 años): dominarán los pilotos y las primeras flotas comerciales.
- ▶ A **medio plazo** (5-15 años): se espera el escalado industrial en camiones y autobuses.
- ▶ A **largo plazo** (>15 años): el hidrógeno tenderá a especializarse en aplicaciones de alta demanda energética dentro de un ecosistema multimodal.

La evolución del mercado ya se traduce en la **existencia de modelos concretos** de vehículos de hidrógeno en varios segmentos de movilidad. Algunos ejemplos de estos modelos son el **Hyundai NEXO** o el **Toyota Mirai** en el ámbito de la movilidad ligera o el **Mercedes-Benz GenH2 Truck** y el **Hyundai XCIENT Fuel Cell** como ejemplos en movilidad pesada.

Marco regulatorio europeo y español

El marco regulatorio es uno de los principales habilitadores del despliegue de la movilidad con hidrógeno. Su función no es solo ordenar el mercado, sino **reducir incertidumbre, fijar objetivos comunes y crear un entorno estable** para la inversión en vehículos, infraestructuras y cadena de suministro.

A escala europea, la movilidad con hidrógeno se integra en la estrategia general de descarbonización a **2030 y 2050**, alineada con el paquete **"Fit for 55"** y con el objetivo de **neutralidad climática en 2050**. En este marco, el hidrógeno renovable y de bajas emisiones se considera una palanca clave para descarbonizar el transporte difícil de electrificar solo con baterías.

Uno de los desarrollos más relevantes del nuevo marco europeo es la **Directiva (UE) 2024/1788** y el **Reglamento (UE) 2024/1789**, que establecen normas comunes para los mercados interiores de gas renovable, gas natural e hidrógeno. Estas normas son clave para avanzar hacia un mercado más competitivo, transparente y trazable para el hidrógeno renovable y de bajas emisiones.

En el ámbito del transporte, el **Reglamento sobre la implantación de Infraestructura para los combustibles alternativos (AFIR) (UE) 2023/1804** es una pieza central, ya que introduce objetivos vinculantes para el despliegue de infraestructura de combustibles alternativos en la red **TEN-T** (Red Transeuropea de Transporte). Su importancia es estratégica porque reduce parte del riesgo regulatorio y da una señal clara al mercado sobre la necesidad de desplegar estaciones de repostaje de hidrógeno.

Junto a AFIR, la **RED III** (Directiva de Energías Renovables de la UE) refuerza el papel del hidrógeno en el transporte al impulsar los combustibles renovables de origen no biológico.

En España, el marco regulatorio parte de la obligación de **trasponer y aplicar** la normativa europea, especialmente AFIR y la nueva regulación de mercado del hidrógeno. Esta ejecución se articula principalmente a través de los ministerios responsables de trasponer el marco regulatorio europeo. La RED III está en proceso de trasposición para el establecimiento de objetivos del sector de la movilidad a través de un Real Decreto. Ya se han realizado los trámites de consultas públicas y se encuentra pendiente del dictamen del Consejo de Estado que se precisa con carácter previo para su aprobación. La parte de industria se iniciaría posteriormente.

Si bien el foco principal del informe se sitúa en la movilidad terrestre rodada, se incluye también un anexo específico sobre aplicaciones ferroviarias de hidrógeno. Su interés no responde tanto al volumen potencial de demanda energética del ferrocarril, que previsiblemente será más limitado que el de otros segmentos de movilidad, sino a las sinergias tecnológicas, industriales y sistémicas que puede generar con el desarrollo del transporte pesado rodado.

En conjunto, la movilidad terrestre con hidrógeno se perfila como una de las **palancas clave para la descarbonización del transporte**, especialmente en aquellos segmentos con mayores exigencias energéticas. La **convergencia entre tecnología, industria, infraestructuras, mercado y regulación** será determinante para consolidar su despliegue y maximizar su contribución a una movilidad más sostenible.



ACCEDE AL INFORME COMPLETO



Observatorio
Tecnológico
del **Hidrógeno**