

Hidrógeno como vector para la movilidad terrestre:

Tecnologías, mercado y
retos para su despliegue

30 abril, 2026

ELABORADO POR:



CON EL RESPALDO DE:



El presente informe ha sido elaborado utilizando la información más precisa y accesible disponible para sus autores. No obstante, ni los autores, ni sus organizaciones o empresas, ni el Observatorio Tecnológico del Hidrógeno asumen responsabilidad alguna por la exactitud de los datos presentados, ni aceptan ninguna obligación derivada del uso que se haga de la información contenida en este documento.

AUTORES

- José Alfredo Lana Calvo, Coordinador de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Enagás
- Arturo Góngora De San Francisco, Técnico de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Enagás
- Irene Garcés Ortiz, Técnico de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Enagás
- Miguel Ángel Castro Pérez, Gerente de Movilidad en Enagás
- José Ignacio Domínguez Carrero, Responsable de Desarrollo de Negocio de Energía en CIDAUT
- Patricia Prieto, Directora de Nuevos Vectores Energéticos en INETUM
- Francisco V. Tinaut Fluixá, Catedrático del Instituto CMT-Clean Mobility and Thermofluids, Universitat Politècnica de València
- Mónica Lupion, Directora Asociada Global de tecnología en Linde
- Elena García Parra, Jefe de proyectos de hidrógeno verde en Bosch
- Luis Correas Usón, Director de Tecnologías Duales y Proyectos Especiales en Fundación CIRCE
- Joan Ramón Morante, Profesor emérito de la Facultad de Física de la Universidad de Barcelona

Observatorio Tecnológico del Hidrógeno, España, abril 2026

ÍNDICE

AUTORES	3
ÍNDICE.....	5
GLOSARIO	11
RESUMEN EJECUTIVO.....	13
1. OBJETO DEL INFORME.....	18
2. TECNOLOGÍAS DE USO DEL HIDRÓGENO.....	19
2.1. Pilas de combustible (Fuel Cells, FC).....	19
2.1.1. Fundamento de las pilas de combustible.....	20
2.1.2. Stack de celdas y Balance de Planta.....	22
2.1.3. Tipologías de pilas de combustible.....	24
2.1.4. Aplicación de las pilas de combustible en los vehículos.....	26
2.1.5. Sistemas de propulsión basados en la combinación de un reformador y una pila de combustible.....	28
2.2. Motores de combustión interna alimentados con hidrógeno (H ₂ -ICE).....	29
2.2.1. Fundamentos y características de los motores H ₂ -ICE.....	29
2.2.2. Tipologías de motores H ₂ -ICE.....	30
2.2.3. Aplicaciones típicas de H ₂ -ICE en movilidad terrestre.....	34
2.3. Comparación tecnológica FC vs H ₂ -ICE (síntesis conceptual).....	37
2.4. Madurez de las diferentes tecnologías.....	38
3. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN VEHÍCULOS.....	42
3.1. Requisitos generales del almacenamiento vehicular de hidrógeno.....	43
3.2. Almacenamiento de hidrógeno gaseoso a alta presión (cH ₂).....	44
3.2.1. Principio de almacenamiento.....	44
3.2.2. Tipologías de depósitos presurizados.....	44
3.2.3. Componentes del sistema de almacenamiento en el vehículo.....	45
3.2.4. Seguridad del almacenamiento a alta presión en vehículos.....	46
3.2.5. Ventajas y limitaciones.....	46
3.3. Almacenamiento de hidrógeno líquido (LH ₂).....	47

3.3.1. Principio de almacenamiento criogénico	47
3.3.2. Características técnicas	47
3.3.3. Ventajas y limitaciones.....	48
3.3.4. Almacenamiento subenfriado	48
3.4. Almacenamiento crio-comprimido.....	48
3.5. Almacenamiento en materiales sólidos	49
3.6. Integración del almacenamiento en el vehículo.....	50
3.7. Normativa y homologación.....	50
3.8. Tendencias y vías de desarrollo	51
4. TECNOLOGÍAS DE REPOSTAJE DE HIDRÓGENO	52
4.1. Estaciones de cH ₂ alimentadas con hidrógeno gaseoso (cH ₂ → cH ₂).....	53
4.1.1. Aproveccionamiento de hidrógeno a la estación	54
4.1.2. Sistema de compresión de hidrógeno.....	55
4.1.3. Sistema de almacenamiento de hidrógeno.....	56
4.1.4. Sistema surtidor de hidrógeno	57
4.1.5. Sistema de refrigeración.....	58
4.1.6. Sistemas auxiliares	59
4.2. Estaciones de cH ₂ alimentadas con hidrógeno líquido (LH ₂ → cH ₂).....	60
4.3. Estaciones de repostaje líquido "on-board" (sLH ₂ → sLH ₂)	62
4.4. Comparación tecnológica arquitectura de repostaje de hidrógeno.....	64
4.5. Infraestructuras comunes de repostaje de hidrógeno	65
4.5.1. Tipologías de estaciones de repostaje de hidrógeno según la forma de aprovisionamiento.....	66
4.5.2. Tipologías de estaciones de repostaje en función de la existencia o no de producción onsite66	
4.6. Estado de desarrollo y modelos de negocio emergentes.....	67
5. MERCADO GLOBAL DE VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO E INFRAESTRUCTURAS	67
5.1. Contexto Global	69
5.2. Vehículos ligeros (turismos y comerciales ligeros)	72

5.3. Vehículos pesados y transporte de mercancías.....	74
5.4. Vehículos fuera de carretera (off-road) y aplicaciones especiales.....	76
5.5. Tendencias del mercado.....	77
5.5.1. Tendencias tecnológicas.....	77
5.5.2. Tendencias de mercado.....	78
5.6. Vehículos de hidrógeno.....	79
6. MARCO REGULATORIO EUROPEO Y ESPAÑOL.....	81
6.1. Marco regulatorio europeo.....	81
6.1.1. Estrategias y objetivos generales de la UE.....	81
6.1.2. Mercado europeo del hidrógeno.....	81
6.1.3. Infraestructura de repostaje de hidrógeno para transporte.....	82
6.1.4. Homogeneización normativa.....	83
6.2. Marco regulatorio en España.....	84
6.2.1. Integración de la normativa europea.....	84
6.2.2. Legislación y planes nacionales.....	84
6.2.3. Regulación de infraestructuras.....	85
6.2.4. Condiciones fiscales y apoyo financiero.....	85
6.3. Aspectos regulatorios transversales aplicables.....	86
6.4. Ámbitos de aplicación y retos regulatorios.....	86
6. CONCLUSIONES.....	87
7. REFERENCIAS.....	90
8. ANEXOS.....	94
8.1. Anexo: Aplicaciones ferroviarias.....	94
8.2. Anexo: Propiedades del H ₂	102
8.3. Anexo: Normativa de calidad de H ₂ como combustible.....	106
8.4. Anexo: Aspectos de seguridad.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Principio de funcionamiento de una pila de combustible (Fuente: elaboración propia)	21
Figura 2.- Curva de polarización de una pila de combustible (Fuente: elaboración propia).	22
Figura 3.- Apilamiento de celdas de combustible (Fuente: elaboración propia)	23
Figura 4.-Tecnología de inyección indirecta (PFI) y directa (DI). [2]	31
Figura 5.- Camión con tecnología HPDI.	33
Figura 6.- Camión desarrollado por EVARM con un sistema dual-fuel utilizado en el Dakar. Fuente: EVARM.	33
Figura 7.-Nivel de madurez de las distintas tecnologías. Fuente: IEA [3]	39
Figura 8.- Densidad energética de las distintas formas de almacenamiento del hidrógeno.	42
Figura 9.- Componentes del sistema de almacenamiento	45
Figura 10.- Arquitecturas de estaciones de repostaje de hidrógeno según estado del combustible: Fuente: Linde, 2026.	53
Figura 11.- Ejemplo de sistema de compresión basado en tecnología de líquido iónico IC90 (Fuente: Linde, 2026). El sistema integra un chiller industrial y un intercambiador de calor para el preenfriamiento del hidrógeno antes del repostaje.	59
Figura 12.- Ejemplo de sistema de bombeo criogénico para estaciones de repostaje LH ₂ usando → cH ₂ . Configuración ilustrativa con 2 bombas criogénicas, dispensadores H70, tanque vertical de LH ₂ y almacenamiento en alta presión. Fuente: Linde, 2026.	62
Figura 13.- Esquema ilustrativo de una estación de repostaje de hidrógeno líquido subenfriado (sLH ₂), incluyendo tanque criogénico, sistema de bombeo, dispensador y logística de suministro.	64
Figura 14.- Estación de repostaje de hidrógeno en la Zona Franca de Barcelona. Fuente: J.R. Morante.	66
Figura 15.- Estaciones de repostaje en España [39].	69
Figura 16.- Flota de vehículos de pila de combustible (FCEV) en Europa [29].	70
Figura 17.- Desarrollo de los vehículos de pila de combustible y estaciones de repostaje. [40]	71
Figura 18.- Evolución prevista del parque de vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCV) en China según los planes nacionales de desarrollo de la industria del hidrógeno. (Figura de elaboración propia adaptada de CAAM – China Association of Automobile Man)	72
Figura 19.- Estación de repostaje de hidrógeno para autobuses de pila de combustible en Corea del Sur. Fuente: Linde.	74
Figura 20.- Tren Coradia iLint	96

Figura 21.- Tren FCH2RAIL, licencia CC BY-NC-ND 4.0. Fuente: CAF	98
Figura 22.- Diagrama de fases del hidrógeno. [48]	102
Figura 23.- Densidad energética del hidrógeno en función de la presión y/o temperatura. Fuente: Elaboración propia.....	103
Figura 24.- Densidad energética del hidrógeno en función de la presión y/o temperatura. Fuente: Elaboración propia.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Resumen de las distintas tecnologías de pila de combustible.....	25
Tabla 2.- Categorías de vehículos de pila de combustible para transporte terrestre.....	27
Tabla 3.- Comparación de la tecnología de pilas de combustible vs. H ₂ -ICE.....	37
Tabla 4.- Poder calorífico de combustibles convencionales vs. Hidrógeno [11].....	43
Tabla 5.- Tipos de tanques de hidrógeno comprimido (Lean Hydrogen, 2025) [11].....	44
Tabla 6.- Características de las tecnologías de compresión en estaciones de repostaje cH ₂	55
Tabla 7.- Resumen de las arquitecturas de estaciones de repostaje de hidrógeno	64
Tabla 8.- Modelos de vehículos con pila de combustible en el mercado.	79
Tabla 9.- Modelos de vehículos con motor de combustión interna en el mercado.	80
Tabla 10.- Propiedades físico-químicas del hidrógeno. Propiedades en condiciones de referencia ISO: 15 °C y 1,013 bar para volumen y 15 °C para cálculos de combustión. Fuente: Enagás	102
Tabla 11.- Poder calorífico inferior y densidad energética volumétrica de combustibles convencionales vs. hidrógeno [40]. [41].....	105
Tabla 12.- Especificaciones de calidad del hidrógeno como combustible aplicadas a vehículos, según ISO 14687:2025 y EN 17124:2022	107
Tabla 13.- Propiedades del hidrógeno referentes a seguridad. Fuente: Enagás.....	108

GLOSARIO

AEM	Anionic Exchange Membrane, Membrana de Intercambio Aniónico
AFC	Alkaline Fuel Cell
AFIR	Alternative Fuel Infrastructure Regulation
BEV	Battery Electric Vehicle
BOP	Balance Of plant/Balance de planta
CAPEX	Capital Expenditure, costes de capital
CEF	Connecting Europe Framework
cH₂	Compressed hydrogen
CcH₂	Cryo-compressed hydrogen
CO₂	Dióxido de carbono
DC	Direct Current, corriente continua
DI	Direct Injection. Inyección directa
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
ESG	Environmental, Social, and Governance
ETS	Emission Trade System
FC/PC	Fuel Cell/Pila de Combustible
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
H₂	Hidrógeno
HDV	Heavy Duty Vehicle
HPDI	Inyección Directa a Alta Presión
ICE	Internal Combustion Engine
IDAE	Instituto de Diversificación y Ahorro Energético
IEA	International Energy Agency
IPCEI/PIICE	Proyectos Importantes de Interés Común Europeo
ISO	International Standard Association
LH₂	Liquified Hydrogen
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier/Portador Líquido Orgánico de Hidrógeno
MEA	Membrane Electrode Assembly
MEP	Motor de Encendido Provocado
MOF	Metal Organic Framework
N₂	Nitrógeno
NH₃	Amoniaco

NO_x	Óxidos de nitrógeno
OPEX	Operation Expenditure, costes de operación
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PFA	PerFluoroAlquilada
PFI	Port Fuel Injection, inyección indirecta
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PNIEC	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
PRTR	Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
RED III	Renewable Energy Directive III
RFNBO	Renewable Fuels of Non-Biological Origin/Combustibles renovables de origen no biológico
SAE	Society of Automotive Engineers
SIE	Spark-Ignition Engine
sLH2	Subcooled Liquid Hydrogen
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
TCO	Total Cost of Ownership
TEN-T	Trans-European Transport Network
TRL	Technology Readiness Level
UE/EU	Unión Europea
UNE	Una Norma Española
UNECE	United Nation Economic Commission for Europe

RESUMEN EJECUTIVO

El hidrógeno está llamado a desempeñar un papel relevante en la descarbonización de la movilidad terrestre por carretera. Su mayor potencial se concentra en aquellos usos donde la electrificación directa mediante baterías presenta limitaciones técnicas, operativas o económicas, especialmente en términos de autonomía, tiempo de repostaje, carga útil, intensidad de uso y disponibilidad operativa. En este contexto, su contribución resulta particularmente valiosa en transporte pesado de larga distancia, autobuses, flotas cautivas, maquinaria y aplicaciones off-road, donde las exigencias energéticas y de operación penalizan más severamente a otras alternativas de cero emisiones.

Este informe técnico del Observatorio Tecnológico del Hidrógeno, desarrollado por Bosch, CIDAUT, CMTClean Mobility and Thermofluids de la Universitat Politècnica de València, Enagás, Fundación CIRCE, Inetum, Linde y la Universidad de Barcelona, analiza de forma integral el papel del hidrógeno como vector energético en la movilidad terrestre por carretera. El documento aborda las principales tecnologías de uso en vehículo, los sistemas de almacenamiento, las infraestructuras de repostaje, la evolución del mercado y el marco regulatorio europeo y español.

Desde el punto de vista tecnológico, el informe identifica dos grandes rutas de utilización del hidrógeno en automoción. La primera son las pilas de combustible, que convierten el hidrógeno en electricidad mediante un proceso electroquímico de alta eficiencia y sin emisiones locales, y que constituyen hoy la opción más madura para movilidad de cero emisiones basada en hidrógeno. En aplicaciones vehiculares, la tecnología dominante es la PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), por su rapidez de arranque, densidad de potencia y buena integración en arquitecturas de propulsión eléctrica. La segunda ruta son los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno (H₂-ICE), que presentan menor eficiencia energética, pero ofrecen una ventaja industrial decisiva: la reutilización parcial de plataformas, cadenas de suministro y el conocimiento acumulado en motores térmicos, lo que permite reducir tiempos de desarrollo, CAPEX inicial y barreras de adopción en determinadas aplicaciones.

Sin embargo, la comparación entre ambas rutas tecnológicas no debe limitarse a la eficiencia o al grado de madurez. La durabilidad del stack constituye un factor crítico en las pilas de combustible, especialmente en aplicaciones intensivas o con ciclos de operación prolongados. A diferencia de los motores de combustión interna, cuya degradación es más conocida y previsiblemente menos sensible en términos de eficiencia, las pilas de combustible pueden requerir reacondicionamiento o sustitución parcial del stack a lo largo de la vida útil del vehículo.

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.

El almacenamiento de hidrógeno es otro de los factores técnicos y económicos más determinantes para la competitividad del vehículo. Debido a la baja densidad energética volumétrica del hidrógeno en condiciones ambientales, el diseño del sistema de almacenamiento condiciona de forma directa la autonomía (cantidad de hidrógeno almacenado), la integración en el vehículo, la seguridad y el coste. En cualquier caso, considerado a nivel de sistema (vehículo + depósito de hidrógeno), el hidrógeno puede ofrecer una relación favorable entre el volumen ocupado a bordo y la energía útil disponible, especialmente en aplicaciones que requieren autonomías elevadas sin penalizar de forma excesiva el espacio útil, la carga transportada o la continuidad operativa.

En la actualidad, el almacenamiento gaseoso a alta presión constituye la solución dominante y comercialmente más viable, mientras que el hidrógeno líquido emerge como una alternativa con elevado potencial para transporte pesado de largo recorrido por su superior densidad energética volumétrica, aunque todavía penalizado por los requisitos de almacenamiento a temperaturas criogénicas, complejidad operativa e inversión asociada. Las soluciones basadas en materiales

sólidos o almacenamiento crio-comprimido permanecen en fases menos maduras o con restricciones relevantes para su implantación generalizada en carretera.

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.

La infraestructura de repostaje constituye el otro gran eje habilitador. El informe describe distintas arquitecturas de estaciones de repostaje, tanto a partir de hidrógeno gaseoso como de hidrógeno líquido, y subraya que la viabilidad del mercado depende de la coordinación temporal entre disponibilidad de estaciones, oferta de vehículos y suministro de hidrógeno competitivo. En este punto, el Reglamento europeo de Infraestructura para los Combustibles Alternativos (AFIR) y el resto del marco europeo aportan una señal de mercado decisiva al introducir objetivos vinculantes para el despliegue de infraestructura en la red transeuropea de transporte, reduciendo parte del riesgo regulatorio. Asimismo, la Directiva RED III refuerza el papel del hidrógeno en el transporte al introducir, por primera vez, objetivos vinculantes específicos para los combustibles renovables de origen no biológico (RFNBO), estableciendo para 2030 que más del 1% del consumo energético del transporte proceda de estos combustibles. A escala española, este marco se refuerza mediante instrumentos como el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) y las convocatorias del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), que apoyan tanto la innovación como el despliegue de vehículos y estaciones de repostaje.

En términos de mercado, el documento retrata un desarrollo todavía temprano, pero con señales claras de segmentación. Los vehículos ligeros de pila de combustible mantienen hoy un peso relevante dentro del parque de vehículos de hidrógeno, concentrado en unos pocos fabricantes y regiones concretas, pero su madurez comercial sigue siendo limitada y fuertemente condicionada por la competencia del vehículo eléctrico de batería. Se ha identificado que más del 90% de estos vehículos ligeros se concentran en Corea del Sur, Estados Unidos, Japón y China. Por otro lado, el mayor dinamismo reciente se desplaza hacia el transporte pesado, las flotas cautivas y las aplicaciones off-road. El despliegue más reciente ha priorizado claramente el camión pesado, cuyo número creció un 72% respecto a 2023, mientras que la red mundial de repostaje supera ya las 1.302 estaciones, con China a la cabeza.

De cara a la evolución temporal del mercado, el informe dibuja una trayectoria en tres horizontes. En el corto plazo, el desarrollo seguirá apoyándose en pilotos, primeras flotas comerciales y nichos con infraestructura dedicada, especialmente en transporte pesado y off-road, con una fuerte dependencia de ayudas públicas e incentivos. En el medio plazo, la maduración tecnológica, la consolidación de corredores de hidrógeno y la reducción de costes deberían permitir un escalado industrial en camiones y autobuses, acercando el coste total de propiedad a las referencias diésel en determinados usos intensivos. En el largo plazo, el hidrógeno tenderá a integrarse en un ecosistema multimodal junto con vehículos eléctricos y combustibles sintéticos, especializándose

en aquellas aplicaciones de alta demanda energética donde sus ventajas estructurales sean más claras.

Aunque 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 conclusión, el hidrógeno puede desempeñar un papel relevante en la transición energética del transporte por carretera, siempre que su despliegue responda a una lógica de segmentación y no a una expectativa de adopción indiscriminada. Su éxito dependerá de la disponibilidad de hidrógeno renovable a precios competitivos, del despliegue de infraestructuras fiables, de la coordinación entre regulación, inversión y oferta tecnológica, y del desarrollo de modelos de negocio integrados que conecten producción, distribución y consumo. Bajo estas condiciones, las pilas de combustible y los motores H₂-ICE podrán convivir de forma complementaria, contribuyendo de manera realista, escalable y económicamente racional a la descarbonización de los segmentos del transporte más difíciles de electrificar.

1. OBJETO DEL INFORME

Este informe tiene como objeto presentar los aspectos más relevantes del estado de la tecnología del hidrógeno aplicado a la movilidad por carretera, tanto en transporte de pasajeros como en transporte pesado. El contenido se estructura de forma esquemática para facilitar la comprensión de los conceptos clave en cada uno de los aspectos considerados:

- Tecnologías de uso del hidrógeno en vehículos
- Sistemas de almacenamiento de hidrógeno en vehículos
- Tecnologías de repostaje de hidrógeno
- Mercado global de vehículos
- Marco regulatorio europeo y español

Incluye además anexos sobre aplicaciones ferroviarias, debido a las sinergias tecnológicas y sistémicas que presentan en relación con la consolidación del hidrógeno como vector de referencia en la descarbonización efectiva del transporte, así como sobre calidad del hidrógeno y aspectos básicos de seguridad.

El informe es el resultado de un trabajo colaborativo entre varios socios del Observatorio Tecnológico del Hidrógeno: Bosch, CIDAUT, Clean Mobility and Thermofluids/Universitat Politècnica de València, Enagás, Fundación CIRCE, Inetum, Linde y la Universidad de Barcelona. Además, este informe está respaldado por Gasnam-Neutral Transport.

2. TECNOLOGÍAS DE USO DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno puede emplearse como vector energético en el transporte por carretera mediante dos enfoques tecnológicos principales:

1. **Conversión electroquímica del hidrógeno en electricidad**, a través de pilas de combustible (Fuel Cells, FC).
2. **Conversión termo-mecánica mediante combustión**, utilizando motores de combustión interna adaptados a hidrógeno (H₂-ICE).

Ambas tecnologías presentan **arquitecturas, rendimientos, niveles de madurez tecnológica y ámbitos de aplicación diferenciados**, lo que justifica su coexistencia dentro del ecosistema de la movilidad basada en hidrógeno. A lo largo del capítulo se desarrollan en detalle los **fundamentos, tipologías y aplicaciones** tanto de las pilas de combustible como de los motores.

El capítulo incorpora también una mención a una **tecnología emergente** los sistemas basados en la **combinación de reformadores y pilas de combustible a bordo**, y finaliza con una **comparación estructurada** entre ambas rutas tecnológicas y un análisis del **nivel de madurez (TRL)** asociado a cada una. Este enfoque integral proporciona una visión clara de la situación actual de las tecnologías de uso del hidrógeno en movilidad y de su evolución previsible en la transición hacia sistemas de transporte descarbonizados.

Es importante indicar que, para un despliegue exitoso de la utilización del hidrógeno en movilidad, es fundamental la integración en el vehículo no sólo de la tecnología de uso del hidrógeno, si no la del tipo de almacenamiento a bordo, lo que se denomina el “paquete energético” (energy pack). Esto está igualmente relacionado con la tecnología desplegada en las estaciones de repostaje de hidrógeno.

2.1. Pilas de combustible (Fuel Cells, FC)

Las pilas de combustible constituyen una de las rutas tecnológicas más consolidadas para el uso del hidrógeno como **vector energético** en movilidad. Su principio de funcionamiento se basa en la conversión electroquímica directa del hidrógeno en electricidad, lo que permite operar con altas **eficiencias** y **cero emisiones locales**, ya que el único producto de la reacción es agua.

2.1.1. Fundamento de las pilas de combustible

Una pila de combustible es un **dispositivo electroquímico** que convierte la energía química del hidrógeno directamente en **energía eléctrica** mediante una reacción redox controlada entre el **hidrógeno** (que actúa como combustible) y el **oxígeno del aire** (que actúa como comburente).

A diferencia de los sistemas basados en combustión, esta conversión no requiere generar calor como etapa intermedia, lo que evita la limitación termodinámica impuesta por el ciclo de Carnot y permite alcanzar **mayores eficiencias**. Como producto de la reacción solo se genera **agua**, sin emisiones locales de contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x), ya que el proceso tiene lugar a temperaturas relativamente bajas.

Cualquier reacción química es un intercambio de electrones entre átomos, unos más proclives a cederlos y otros a admitirlos. La síntesis del agua a partir de hidrógeno y oxígeno en las pilas de combustible se produce en dos semi reacciones. En cada una de ellas el electrón en juego tendrá un voltaje determinado para el cual se producirá la reducción o la oxidación, lo que se denomina **potencial de reducción**.

Existen diferentes tipologías de pilas de hidrógeno, que se expondrán posteriormente. Para la explicación base se toma como referencia la pila PEM (Proton Exchange Membrane) que es la más utilizada en la actualidad para movilidad.

Oxidación en el ánodo

Partiendo de dos moléculas de hidrógeno diatómico (H₂) en estado gaseoso, éstas entran en contacto con el electrodo negativo, el ánodo, donde, en presencia de un catalizador y bajo un determinado potencial, liberan cuatro electrones, oxidándose:



Los protones (H⁺) formados se disuelven en el agua que humedece el electrodo y difunden a través de una membrana conductora de protones (*Proton Exchange Membrane*, PEM) semipermeable y aislante eléctrico que impide el paso de los gases. Los electrones circulan por el circuito eléctrico externo y su energía se utiliza en el motor eléctrico del vehículo.

Reducción en el cátodo

En el cátodo, y en presencia de catalizador, el oxígeno diatómico (O₂) capta los electrones en los electrodos y se reduce a dos iones O²⁻.



Inmediatamente, los protones (H^+) se combinan con los iones O^{2-} para formar dos moléculas de agua.

Un esquema de funcionamiento de una pila PEM se muestra en la Figura 1.

Estas dos semi reacciones producen idealmente un **voltaje** conjunto de **1,23 voltios**, (suma de los **potenciales de reducción** respectivos), aunque voltaje real se sitúa en torno a **0,7 V**. El voltaje real es inferior al voltaje en condiciones ideales por las irreversibilidades del proceso, debidas a voltajes mínimos de activación, pérdidas resistivas y fenómenos de transporte de los fluidos.

La **intensidad de corriente** generada es proporcional a la cantidad de moléculas que reaccionan por unidad de tiempo. Dada la baja cinética de las reacciones a temperatura ambiente, se utilizan catalizadores específicos en ambos electrodos.

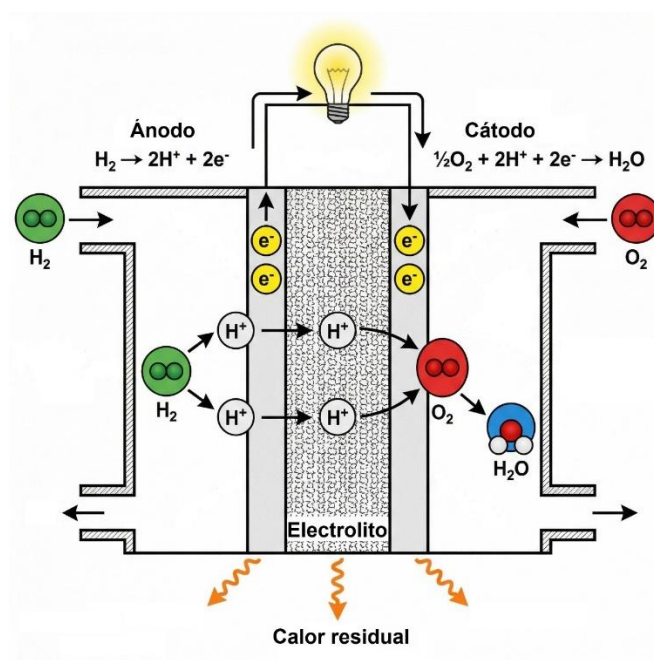


Figura 1.- Principio de funcionamiento de una pila de combustible (Fuente: elaboración propia)

La relación entre el voltaje generado y la intensidad de corriente no es constante, sino que sigue una **curva de polarización** (Figura 2), específica para cada tipo de celda de combustible y diseño concreto, pero todas similares. Esta curva muestra que el voltaje es máximo en circuito abierto (intensidad cero) y desciende bruscamente en la región de bajas intensidades debido a los voltajes de activación de las reacciones. Posteriormente, entra en una zona de operación práctica que tiene comportamiento resistivo, en la que el voltaje disminuye proporcionalmente con la intensidad de corriente. Finalmente, cuando la intensidad aumenta hacia valores elevados, se produce un descenso pronunciado del voltaje motivado por las **pérdidas de transporte**, debido

a las dificultades para alimentar adecuadamente los electrodos con los gases reactivos y retirar el agua generada. Esta región final define los límites operativos de la pila y condiciona su diseño y control. Como consecuencia directa de la variabilidad del voltaje con la intensidad, resulta imprescindible incorporar un sistema de **condicionamiento de potencia**, normalmente mediante un convertidor DC/DC, cuya función consiste en adaptar la salida eléctrica de la pila para ofrecer un voltaje estable y compatible con el sistema de propulsión y la batería auxiliar del vehículo.

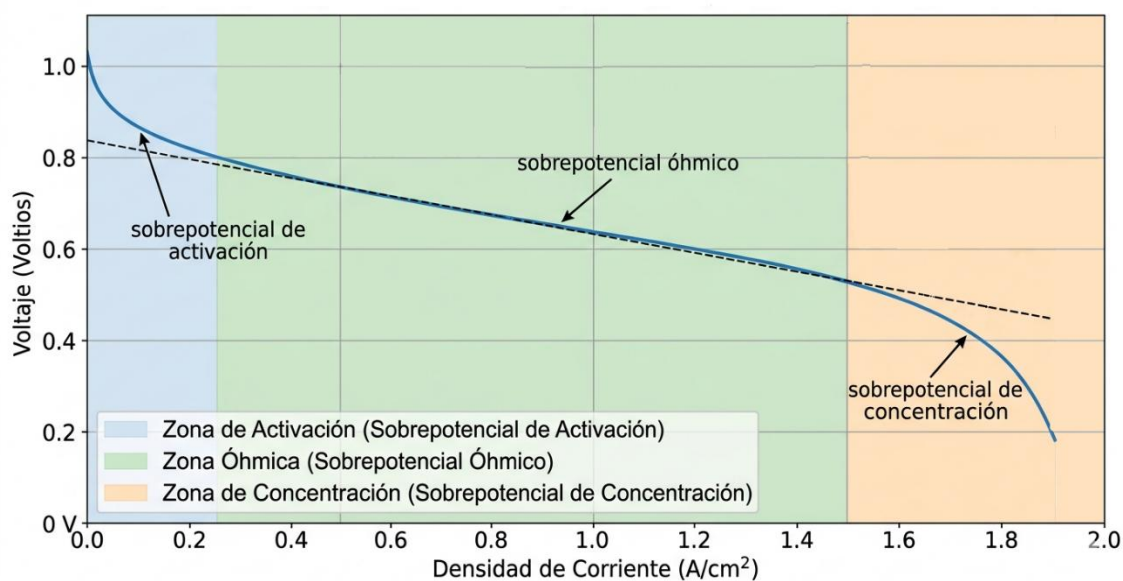


Figura 2.- Curva de polarización de una pila de combustible (Fuente: elaboración propia).

A diferencia de las máquinas térmicas tradicionales, las pilas de combustible presentan **mayor eficiencia cuando operan a cargas bajas**, una característica relevante para su integración en vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV).

2.1.2. Stack de celdas y Balance de Planta

Con el objetivo de alcanzar voltajes eléctricos que resulten utilizables en aplicaciones de movilidad, las pilas de combustible no funcionan como una única celda electroquímica aislada. En su lugar, se **construyen apilamientos de numerosas celdas individuales**, del orden de varias decenas o unos pocos centenares, conectadas eléctricamente en serie. Este conjunto recibe el nombre de **stack**. Cada celda del stack está formada por la **membrana y dos electrodos**, conocidos en conjunto como **MEA (Membrane Electrode Assembly)**, y se encuentra cerrada

lateralmente mediante **placas bipolares**. Estas placas son láminas metálicas que producen la estanqueidad entre el lado hidrógeno y el lado aire, manteniendo la conductividad eléctrica entre celdas. En este diseño, el **circuito iónico** discurre internamente a través de la membrana en cada celda, avanzando de un extremo al otro del stack en serie, sumando los voltajes de cada celda. El **circuito eléctrico externo** parte de la placa colectora de un extremo para conectar con la correspondiente placa colectora del otro extremo (Figura 3).

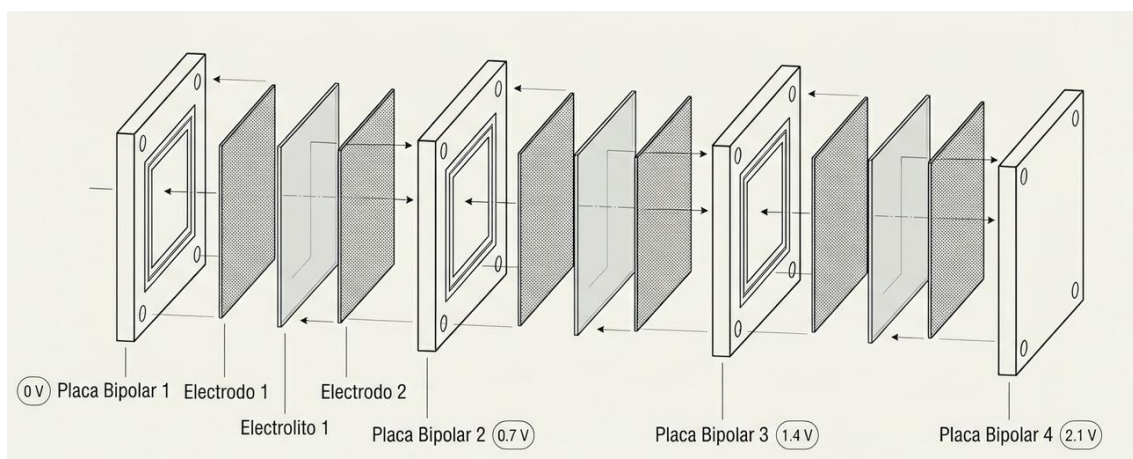


Figura 3.- Apilamiento de celdas de combustible (Fuente: elaboración propia)

El **stack** de la pila de combustible requiere una serie de **componentes externos** para poder funcionar correctamente, del mismo modo que un motor de combustión interna necesita sistemas auxiliares como el radiador, el filtro de aceite o el catalizador de escape. Estos sistemas auxiliares forman el denominado **balance de planta (BOP)**, que agrupa todos los elementos necesarios para que la pila de combustible opere dentro de sus condiciones óptimas y garantice prestaciones estables y seguras durante la operación del vehículo.

El balance de planta está compuesto por los siguientes subsistemas:

- **Sistema de suministro de hidrógeno.** Este subsistema incluye un **regulador de presión** para adecuar el hidrógeno procedente de los depósitos a las condiciones requeridas por el ánodo, así como una **válvula de purga** destinada a evacuar el agua que pueda acumularse en este lado de la celda, ya que la presencia excesiva de agua puede producir **inundación del ánodo** y comprometer la operación adecuada. En función del diseño, también puede incorporarse un **recirculador de hidrógeno no consumido**, cuya función es mejorar la eficiencia del sistema aprovechando el hidrógeno que no ha reaccionado durante el paso anterior por el ánodo.

- **Sistema de alimentación de aire.** El aporte de oxígeno para la reacción electroquímica se realiza mediante un **soplador de aire**, que introduce el caudal necesario a través de un sistema de **filtración**, garantizando que las impurezas y partículas ambientales no accedan al interior del cátodo. Este suministro debe ser continuo y estable para asegurar la correcta alimentación del lado oxidante de la pila.
- **Sistema de humidificación.** Tanto el hidrógeno como el aire deben mantenerse en condiciones de **humedad adecuadas**, ya que la membrana conductora de protones requiere estar humedecida para asegurar su funcionalidad electroquímica. Esta humidificación es esencial para preservar la conductividad protónica y evitar daños o pérdida de rendimiento de la membrana durante la operación
- **Sistema de refrigeración.** El stack debe operar dentro de un intervalo de temperatura estrecho, por lo que utiliza un **circuito de refrigeración** comparable al de un motor de combustión interna, aunque con requisitos técnicos específicos derivados del funcionamiento electroquímico de la pila. La refrigeración permite extraer el calor generado durante las reacciones y mantener la estabilidad térmica necesaria para evitar degradación prematura de los materiales que conforman la MEA.
- **Convertidor DC/DC.** El sistema incorpora un **convertidor DC/DC** cuya función es proporcionar un voltaje estable y adecuado para la batería del vehículo y el motor eléctrico. Esta necesidad se origina por el propio comportamiento eléctrico de la pila, cuyo voltaje varía en función de la intensidad de corriente y del estado operativo.
- **Unidad de control.** El sistema requiere una **unidad de control** responsable de gestionar los flujos de hidrógeno y aire, la humidificación, la temperatura, la potencia eléctrica generada y la seguridad global de la pila. Esta unidad coordina todos los subsistemas del balance de planta para que la pila funcione de manera estable, eficiente y dentro de los límites operativos establecidos.

2.1.3. Tipologías de pilas de combustible

La **membrana conductora de protones** es un elemento determinante en el funcionamiento de la pila, ya que fija las condiciones de operación. Al tratarse de una lámina polimérica fina, esta membrana debe trabajar a temperaturas bajas y muy controladas. Las membranas empleadas en la **tecnología PEM**, principalmente basadas en materiales **perfluoroalquilados (PFAs)** como el Nafion®, requieren catalizadores de elevada actividad, pertenecientes a la familia del **platino**, capaces de soportar un entorno altamente ácido en los electrodos. Estos materiales PFAs forman

parte de los llamados “químicos eternos”, lo que implica que, a largo plazo, deberán reemplazarse por alternativas con mayor compatibilidad ambiental.

En la búsqueda de soluciones alternativas para el electrolito y la membrana, han aparecido nuevos conceptos, como las **pilas AEM** (Anion Exchange Membrane). En esta variante, el ion transportado no es el protón (H^+) sino el ion hidróxido (OH^-). Este entorno básico permite emplear **catalizadores y materiales menos costosos**, lo que representa una vía de desarrollo relevante desde la perspectiva de sostenibilidad y coste.

Existen numerosos materiales conductores de iones, lo cual da lugar a distintas familias de pilas de combustible:

- **Electrolito líquido de potasa (KOH).** La tecnología más antigua empleaba este tipo de electrolito. Aunque es ampliamente utilizado en **electrolizadores** (la tecnología inversa a la pila), su uso en pilas de combustible está muy limitado debido a que la potasa reacciona con el CO_2 atmosférico precipitando, lo que dificulta la operación estable en ambientes abiertos.
- También existen **materiales cerámicos** capaces de conducir iones O^{2-} , pero requieren temperaturas muy elevadas, superiores a $600\text{ }^\circ\text{C}$. Aunque estos sistemas presentan una alta eficiencia, no resultan adecuados para aplicaciones de movilidad debido a los frecuentes arranques y paradas que son requeridos.
- Otra tecnología destacada es la de **pilas de ácido fosfórico (PAFC)**, que fueron las primeras en comercializarse y se utilizaron en aplicaciones de movilidad urbana en Estados Unidos durante los años noventa. Sin embargo, su peso elevado y el largo tiempo de calentamiento requerido han hecho que queden desplazadas frente a la tecnología PEM, más ligera y con mejores características de arranque.

A continuación, en la Tabla 1 se comparan los distintos tipos de pilas de combustible, mostrándose las ventajas y limitaciones de cada topología.

Tabla 1.- Resumen de las distintas tecnologías de pila de combustible

Pila de combustible	Descripción	Ventajas	Limitaciones
PEMFC - Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Membrana de intercambio protónico	<ul style="list-style-type: none"> - Electrolito polimérico sólido, mayor simplicidad al no gestionar líquidos - Temperatura de operación baja (60°C-80°C) - Arranque rápido. - Excelente respuesta dinámica 	<ul style="list-style-type: none"> - Ambiente muy ácido. - Materiales de altas prestaciones, mayor coste - Uso de catalizadores basados en platino: mayor coste y alta pureza del hidrógeno requerida (sensibilidad al CO).

		<ul style="list-style-type: none"> - Alta densidad de corriente - Compactas y alta eficiencia específica 	<ul style="list-style-type: none"> - El agua generada es en forma líquida
DMFC - Direct Methanol Fuel Cell	Variante de PEMFC que puede procesar metanol	Mejor almacenamiento y logística del metanol frente al hidrógeno	Menor densidad de corriente, mayor carga de catalizador de platino, menor eficiencia
PEM de "alta temperatura"	Variante de PEMFC que usa membranas que operan por encima de 100° C	<ul style="list-style-type: none"> - El agua generada es en forma gas, más fácil de gestionar. - Más sencillas de refrigerar - Mayor tolerancia a CO 	<ul style="list-style-type: none"> - Durabilidad menor - Arranque lento - Mayor degradación química
AFC - Alkaline Fuel Cell	Electrolito alcalino (solución de KOH)	<ul style="list-style-type: none"> - Costes reducidos por materiales económicos. - Durabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Muy sensible al CO₂ (precipita electrolito), necesita O₂ puro en lugar de aire (uso limitado a aplicaciones espaciales). - Electrolito corrosivo en caso de derrame
SOFC - Solid Oxide Fuel Cell	Electrolito cerámico, conductor a alta temperatura (600–1.000 °C)	<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiencia global. - Capaz de procesar directamente combustibles convencionales 	<ul style="list-style-type: none"> - Lentitud en arranque - Riesgo de choque térmico

2.1.4. Aplicación de las pilas de combustible en los vehículos

Las pilas de combustible se integran en los **vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV)**, en los cuales el hidrógeno se utiliza como portador de energía para generar electricidad a bordo mediante la reacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno del aire. La electricidad producida por la pila alimenta el sistema de propulsión eléctrica del vehículo, normalmente con el apoyo de un sistema de almacenamiento eléctrico auxiliar, como baterías o supercondensadores.

En la propulsión por pila de combustible, la potencia de conducción es suministrada por la pila de combustible y la batería se utiliza exclusivamente para la recuperación de la energía durante la frenada, mediante frenada regenerativa, y la asistencia eléctrica durante la aceleración.

En los **turismos**, la pila de combustible suele tener potencias en el entorno de **100 a 150 kW**, mientras que la batería presenta una alta densidad de potencia, pero baja capacidad energética, alrededor de **1 a 2 kWh**. El depósito de hidrógeno, almacenado a alta presión, contiene

típicamente **entre 5 y 6 kg de hidrógeno**, lo que permite alcanzar autonomías de hasta **600 km**. El suministro energético se realiza exclusivamente mediante repostaje de hidrógeno.

En otra arquitectura, denominada **extensor de autonomía**, la potencia necesaria para la propulsión la proporciona principalmente la **batería**, mientras que la pila de combustible se utiliza para **recargar dicha batería durante la marcha**, aumentando así la autonomía del vehículo. Los turismos con autonomía extendida suelen presentar una densidad de potencia más baja, una batería de alta capacidad, una pila de combustible de baja potencia (20 a 30 kW) y un tanque de hidrógeno presurizado de pequeño volumen. Esta configuración permite diseñar el vehículo como **enchufable**, combinando la recarga eléctrica convencional con el repostaje de hidrógeno, lo que proporciona mayor flexibilidad operativa.

Los principales **beneficios asociados** al uso de pilas de combustible en movilidad son los siguientes:

- Amplio rango de potencia, adaptable a múltiples aplicaciones.
- Densidad de potencia líder, con requisitos de espacio reducidos.
- Alta capacidad de personalización, en función de las condiciones operativas requeridas.
- Disponibilidad en distintos niveles de integración, según las necesidades del cliente.
- Aplicabilidad transversal, desde turismos hasta vehículos comerciales pesados, pasando por flotas especializadas.

En la Tabla 2 se presenta una comparativa de vehículos que incorporan pilas de combustible. Se incluye tipología de vehículos, aplicaciones, configuración, ventajas y observaciones:

Tabla 2.- Categorías de vehículos de pila de combustible para transporte terrestre.

Categoría	Aplicaciones / Ejemplos	Características / Arquitectura	Ventajas / Razones clave	Observaciones
Vehículos ligeros (turismos y furgonetas)	Turismos, taxis, flotas urbanas	FCEV híbrido (pila de combustible + batería)	- Autonomías elevadas (500–700 km) - Repostaje rápido (3–5 min) - Cero emisiones locales	Especialmente atractivos para uso intensivo y flotas donde el tiempo de parada es crítico

<p>Transporte pesado por carretera</p>	<p>Camiones de largo recorrido, autobuses interurbanos y urbanos, vehículos logísticos de alta carga</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Limitaciones del BEV en peso de baterías - Mejor escalabilidad energética del hidrógeno - Alta disponibilidad operativa 	<p>Segmento prioritario para el despliegue de pila de combustible a medio plazo</p>
<p>Aplicaciones especiales y flotas cautivas</p>	<p>Vehículos municipales, logística interna (carretillas elevadoras, etc.), aeropuertos, puertos, entornos industriales y vehículos especiales (obras públicas, minería, etc.)</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Infraestructura dedicada disponible - Mayor viabilidad técnica y económica 	<p>Especialmente viables en entornos controlados</p>

2.1.5. Sistemas de propulsión basados en la combinación de un reformador y una pila de combustible

La movilidad basada en pila de combustible presenta un reto significativo, **aumentar** la cantidad de hidrógeno a bordo con el fin de ampliar la **autonomía del vehículo** y, con ello, su rango de aplicación. Aunque es posible incrementar la autonomía mediante el **almacenamiento de hidrógeno a presión** o mediante su almacenamiento en **estado líquido**, existe una tercera alternativa emergente: obtener el hidrógeno directamente a bordo del vehículo a partir de otras **moléculas líquidas** que lo contienen, tales como metanol o amoniaco. Esta estrategia se basa en la combinación integrada de un sistema de reformado y una pila de combustible, ambos embarcados en el propio vehículo. Es una tecnología emergente todavía en desarrollo.

El principio de este concepto reside en realizar un **reformado catalítico** del combustible líquido para producir una corriente rica en hidrógeno. Esta corriente alimenta posteriormente una **pila de combustible de hidrógeno**, que convierte la energía química del hidrógeno generado en energía eléctrica para la propulsión. El empleo de moléculas líquidas con elevada **densidad energética volumétrica** permite reducir el volumen total necesario para el almacenamiento energético a bordo, especialmente en vehículos con **altas demandas energéticas**, ya sea por potencia requerida o por necesidades de autonomía.

En aquellos casos en los que la aplicación exige **elevada autonomía**, el sistema completo (reformador, pila de combustible y tanque con combustible líquido) puede resultar más compacto que una solución basada en almacenar directamente el hidrógeno comprimido o licuado junto con la pila. Este **aumento de compacidad** se traduce en una ventaja potencial para segmentos donde el espacio a bordo es limitado o donde el volumen del sistema de almacenamiento condiciona de forma significativa el diseño del vehículo.

Generalmente el **empleo** de estas **corrientes** obtenidas del **reformado** a hidrógeno de moléculas líquidas requiere una **adaptación** de la **pila** de combustible, ya que la corriente anódica estará compuesta de hidrógeno y otro inerte (CO₂ si se reforma metanol, etanol o N₂ si se craquea NH₃), siendo normalmente además pilas de combustible de ánodo abierto.

2.2. Motores de combustión interna alimentados con hidrógeno (H₂-ICE)

Los **motores de combustión interna alimentados con hidrógeno** constituyen una de las alternativas más estudiadas para incorporar este **vector energético** en los sistemas actuales de movilidad terrestre.

2.2.1. Fundamentos y características de los motores H₂-ICE

A diferencia de las pilas de combustible, que transforman la energía química del hidrógeno en electricidad mediante un proceso electroquímico, los motores H₂-ICE emplean un principio de funcionamiento más tradicional: la **combustión controlada del hidrógeno en un motor térmico**. En este proceso, la energía química del combustible se convierte primero en energía térmica y posteriormente en trabajo mecánico a través del ciclo termodinámico del motor.

Aunque desde un punto de vista teórico la eficiencia global de estos motores es inferior a la de las pilas de combustible, presentan una ventaja decisiva: la gran **similitud tecnológica con los motores de combustión interna convencionales**. Gracias a ello, una parte significativa de la infraestructura industrial existente, del conocimiento acumulado y de las cadenas de suministro actuales puede reutilizarse o adaptarse con relativa facilidad, reduciendo los tiempos de desarrollo y los costes iniciales.

El **hidrógeno** presenta **propiedades físico-químicas** particulares que **condicionan** profundamente su **comportamiento** como combustible en motores de combustión interna:

- **Amplio rango de inflamabilidad.** El hidrógeno puede inflamarse en mezclas con aire que oscilan aproximadamente entre el **4% y el 75% en volumen**, un rango significativamente superior al de los combustibles hidrocarbonados. Esta característica

permite que el motor funcione con **mezclas pobres**, es decir, con una proporción de hidrógeno relativamente baja respecto al aire, lo que puede mejorar la eficiencia y reducir la temperatura media de combustión.

- **Alta velocidad de propagación de llama.** La llama del hidrógeno se propaga con mayor rapidez que la de los combustibles fósiles convencionales, lo que favorece una combustión rápida y potencialmente más completa. No obstante, esta misma propiedad aumenta el riesgo de fenómenos indeseados como el **pre-encendido** o el **retroceso de llama** (*flash-back*) hacia la admisión.
- **Bajo contenido energético volumétrico.** Aunque el hidrógeno tiene una elevada energía específica por unidad de masa, su **densidad es muy baja**, lo que implica que, para almacenar cantidades equivalentes de energía es necesario recurrir a sistemas de almacenamiento a alta presión o en estado líquido, con implicaciones directas sobre el diseño del vehículo y del sistema de alimentación.
- **Aspectos ambientales.** Dado que el hidrógeno no contiene carbono, su combustión **no produce CO₂**. Sin embargo, las altas temperaturas que pueden alcanzarse durante el proceso favorecen la formación de **óxidos de nitrógeno (NO_x)**. No obstante, los estudios más recientes indican que estas emisiones pueden reducirse de forma muy significativa mediante estrategias adecuadas de combustión y sistemas de postratamiento. En particular, se ha señalado que las emisiones brutas de NO_x de un motor H₂-ICE pueden ser aproximadamente **un orden de magnitud inferiores** a las de un motor diésel convencional, y que, con la incorporación de sistemas específicos de control, pueden alcanzarse niveles **cercanos a cero**. [1]

2.2.2. Tipologías de motores H₂-ICE

Dentro del ámbito de los motores H₂-ICE pueden distinguirse diferentes tipologías en función del sistema de encendido y del diseño original del motor.

2.2.2.1 Tipologías de motores H₂-ICE según sistema de encendido

Esta primera clasificación se basa en el **mecanismo** mediante el cual se **inicia** la **combustión** de la mezcla aire-hidrógeno en el interior del cilindro.

a) Motores de encendido provocado (MEP / SIE, Spark Ignition Engines)

Los **motores de encendido provocado** constituyen la configuración más extendida y tecnológicamente madura. En estos motores, basados en el ciclo termodinámico **Otto**, la mezcla

de aire e hidrógeno se introduce en el cilindro durante la fase de admisión y posteriormente se comprime antes de ser encendida mediante una chispa generada por una bujía.

La introducción del hidrógeno en el cilindro puede realizarse mediante diferentes **estrategias de inyección**, (Figura 4):

- **Inyección indirecta, multipunto o (PFI, Port Fuel Injection)**. Es una de las más simples. En este sistema, los inyectores están situados en el colector de admisión cerca de la válvula de entrada, de forma que el hidrógeno se mezcla con el aire antes de la entrada al cilindro. Es una configuración adecuada para motores **dual-fuel**, en los que el hidrógeno se aporta por la admisión y se combina con un combustible adicional inyectado directamente en el cilindro (gasolina, gasóleo, gas natural).
- **Inyección directa en el cilindro (DI, Direct Injection)**. El hidrógeno se inyecta directamente en la cámara de combustión. Esta arquitectura reduce el riesgo de retroceso de llama, permite una formación de mezcla más precisa, mejora la potencia específica, y da lugar a un comportamiento más controlado frente a pre-encendido. Permite un control más preciso de la mezcla y puede contribuir a mejorar la potencia específica del motor. Con este sistema se consigue una alta eficiencia y una reducción significativa de emisiones.

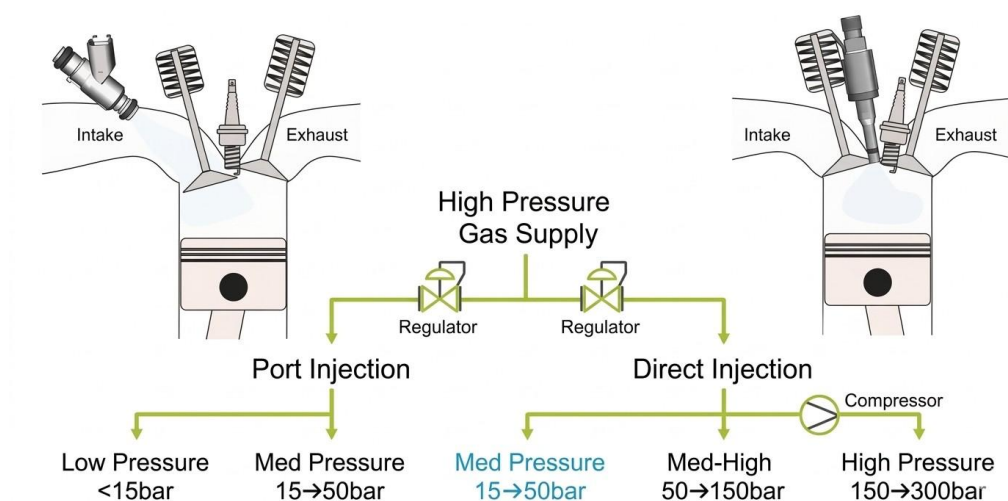


Figura 4.-Tecnología de inyección indirecta (PFI) y directa (DI). [2]

Los **motores de encendido provocado** destacan por su **elevada compatibilidad** con plataformas de motores de gasolina existentes, lo que facilita su desarrollo y permite reducir los costes asociados a la transición tecnológica.

Una de las principales **ventajas** de los motores de encendido provocado alimentados con hidrógeno es la posibilidad de operar con **mezclas muy pobres**. El **exceso de aire** contribuye a **reducir** la **temperatura** de combustión y, por tanto, a **limitar** la formación de **NO_x**, al tiempo que se mejora la eficiencia térmica del motor.

Sin embargo, el uso de **hidrógeno** introduce también diversos **desafíos** técnicos:

- Una mezcla pobre implica una **menor entrada de combustible** en la cámara de combustión del motor, por lo que la potencia se reduce. Esta situación se puede paliar utilizando un **mayor grado de sobrealimentación** en el motor, aunque no siempre existe la energía necesaria en los gases de escape para conseguir la turbosobrealimentación que se requiere. La combinación con sistemas eléctricos de sobrealimentación permite aumentar la potencia, aunque el rendimiento efectivo se penaliza.
- Necesidad de **controlar el pre-encendido** por puntos calientes dentro de cilindro, que puede producirse debido a la baja energía de ignición del hidrógeno, y la prevención del retroceso de llama hacia el sistema de admisión (más fácilmente controlable en el caso de inyección directa). Además, aunque la eficiencia de estos motores puede ser elevada dentro del contexto de los motores térmicos, sigue siendo inferior a la que pueden alcanzar los sistemas basados en pilas de combustible.

b) Motores de encendido por compresión (dual-fuel o H₂-CI)

Otra configuración posible corresponde a los **motores de encendido por compresión** que operan en modo **dual-fuel**. En estos sistemas, el hidrógeno actúa como combustible principal, pero la combustión se inicia mediante la inyección de una pequeña cantidad de **combustible piloto** (diésel o combustible sintético), en un porcentaje respecto del total en términos de energía que actualmente puede alcanzar el 5%. Este combustible piloto se autoenciende debido a la elevada relación de compresión, característica de los motores diésel, y genera el frente de llama necesario para iniciar la combustión del hidrógeno presente en la cámara. Aunque esta solución es menos común que la de encendido provocado, ha despertado un notable interés en aplicaciones de **transporte pesado**.

La principal **ventaja** de los **motores dual-fuel** radica en su alta capacidad para **aprovechar** plataformas de **motores diésel ya existentes**, conocidas por su robustez, su elevada eficiencia y su gran capacidad para generar par motor a bajas revoluciones,

2.2.2.2 Tipologías de motores H₂-ICE según diseño original del motor

Otra forma de clasificar los motores H₂-ICE consiste en analizar si el **diseño** del motor ha sido concebido **específicamente** para operar con **hidrógeno** o si, por el contrario, se trata de una **adaptación** de un motor existente.

- **Motores dedicados de hidrógeno.** El diseño geométrico y los materiales se optimizan desde el inicio para aprovechar las propiedades particulares de este combustible. Esto puede implicar relaciones de compresión específicas, configuraciones de válvulas adaptadas o materiales capaces de resistir mejor las condiciones térmicas y químicas asociadas a la combustión del hidrógeno.
- **Motores adaptados o retrofitting.** Se busca transformar motores existentes para que puedan utilizar hidrógeno como combustible, total o parcialmente. Este enfoque resulta especialmente atractivo desde el punto de vista económico y logístico, ya que permite aprovechar equipos y plataformas ya disponibles. Existen diversas estrategias de conversión posibles. Un motor originalmente diseñado para gas natural, por ejemplo, puede adaptarse para funcionar con mezclas de gas natural e hidrógeno. De forma similar, un motor diésel puede transformarse en un sistema dual-fuel que utilice hidrógeno junto con una pequeña cantidad de diésel como combustible piloto. En algunos casos, incluso es posible realizar una conversión completa hacia un motor de encendido provocado alimentado exclusivamente con hidrógeno.

2.2.3. Aplicaciones típicas de H₂-ICE en movilidad terrestre

Desde la perspectiva de la movilidad terrestre, los motores H₂-ICE se perfilan como una **solución de transición** o de complementariedad dentro del proceso de **descarbonización** del transporte. Aunque las pilas de combustible y los sistemas eléctricos de batería suelen considerarse las tecnologías más prometedoras a largo plazo, los motores de combustión de hidrógeno ofrecen ventajas relevantes en determinados nichos de aplicación.

2.2.3.1 Transporte pesado y maquinaria

Uno de los ámbitos en los que esta tecnología resulta particularmente atractiva es el del **transporte pesado y la maquinaria industrial**. Vehículos como camiones de obra, maquinaria de construcción o equipos industriales de gran potencia requieren sistemas de propulsión robustos, capaces de operar durante largos periodos en condiciones exigentes.

En estos contextos, la **robustez mecánica** de los motores de combustión interna constituye una ventaja significativa. Además, la **integración** de motores H₂-ICE en **plataformas existentes** puede realizarse con relativa facilidad, lo que **reduce** tanto el **tiempo** de desarrollo como los **costes** iniciales.

En comparación con los sistemas basados en pilas de combustible, que requieren componentes más complejos y costosos, los **motores de combustión de hidrógeno** pueden **ofrecer** una **solución más económica** en determinadas fases de la transición energética.

2.2.3.2 Aplicaciones off-road y entornos controlados

Otro ámbito de aplicación corresponde a los **entornos off-road** y a aquellos **sectores** en los que los **vehículos operan** en **áreas** relativamente **controladas**. Actividades como la agricultura, la minería o la construcción suelen desarrollarse en zonas específicas donde la infraestructura de repostaje suele diseñarse de forma dedicada.

En estos casos, la **disponibilidad de estaciones de suministro** de hidrógeno **no** depende de una **red pública** extensa, lo que **facilita la adopción temprana** de esta tecnología. Además, en estos sectores el criterio dominante suele ser el coste total de propiedad (TCO, Total Cost of Ownership), que incluye tanto la inversión inicial como los costes operativos a lo largo de la vida útil del equipo.

Si los motores H₂-ICE permiten reducir las emisiones de carbono sin incrementar significativamente estos costes, su adopción puede resultar especialmente atractiva.

2.2.3.3 Flotas existentes y transición tecnológica

Los motores de combustión de hidrógeno también pueden desempeñar un papel relevante en la transición tecnológica de las **flotas existentes**. Muchas empresas y operadores de transporte disponen de grandes cantidades de vehículos equipados con motores de combustión interna convencionales. La **posibilidad de convertir o adaptar** estos motores para utilizar hidrógeno ofrece una vía relativamente rápida para reducir las emisiones de dióxido de carbono sin necesidad de sustituir completamente los vehículos o rediseñar la arquitectura de propulsión.

Asimismo, esta estrategia permite **aprovechar las cadenas de suministro**, los procesos de **fabricación** y la experiencia acumulada durante décadas en el desarrollo de motores térmicos.

A continuación, se indican algunas **ventajas** de los motores de combustión interna alternativos que usan hidrógeno como combustible en el entorno de movilidad.

- Se utiliza un ICE, con una experiencia consolidada en Europa en el uso de otros combustibles.
- Diversas opciones de combustible: H₂ puro o en combinación con gas natural y diésel, etc.
- Pureza del hidrógeno requerida inferior a la de las pilas de combustible.
- Reducción de CO₂ en la misma proporción que la fracción de energía equivalente del H₂
- Adaptabilidad de motores de combustión interna existentes (gasolina, gas natural, diésel)
- Coste inferior de los vehículos (nuevos o adaptados) en comparación con los vehículos de pila de combustible.
- Generación de demanda a corto plazo de hidrógeno, lo que permite el despliegue de sistemas de producción, distribución y suministro de hidrógeno.

A su vez, los motores de combustión interna de hidrógeno presentan algunas **limitaciones**:

- Menor eficiencia energética a bordo (mayor consumo de H₂) en comparación con las pilas de combustible.
- Oferta comercial reducida para camiones: rígidos, cabezas tractoras, off-road.
- Necesidad de ampliar la disponibilidad de componentes específicos para funcionar con H₂: bujías, inyectores, depósitos, sistemas de sobrealimentación avanzados, sistemas de postratamiento en escape, etc.

En conjunto, los **motores H₂-ICE** representan una alternativa tecnológica que **combina** elementos de **continuidad** y de **innovación**. Aunque su eficiencia teórica no alcanza la de otras soluciones basadas en el hidrógeno, su compatibilidad con las tecnologías existentes y su potencial de adaptación a múltiples aplicaciones los convierten en una opción relevante dentro del panorama actual de la movilidad sostenible. En particular, su capacidad para integrarse en sectores donde la electrificación directa resulta más compleja sugiere que estos motores podrían desempeñar un papel significativo en las etapas intermedias del proceso de descarbonización del transporte.

2.3. Comparación tecnológica FC vs H₂-ICE (síntesis conceptual)

La comparación tecnológica entre los sistemas de **pila de combustible** (FC) y los **motores de combustión interna alimentados con hidrógeno** (H₂-ICE), constituye un elemento central para evaluar las distintas trayectorias de implantación del hidrógeno en la movilidad terrestre.

Si bien ambas opciones permiten reducir la dependencia de combustibles fósiles, difieren de manera significativa en algunos aspectos, los cuales quedan reflejados en la Tabla 3.

Tabla 3.- Comparación de la tecnología de pilas de combustible vs. H₂-ICE

Aspecto	Pilas de combustible	H ₂ -ICE
Conversión energética	Electroquímica	Termoquímica
Eficiencia	Alta	Media / Alta
Emisiones locales	Cero	NO _x (controlables)
Coste inicial	Elevado	Moderado
Aplicaciones óptimas	Transporte pesado, flotas	Off road, transición

La comparación entre pilas de combustible y motores de combustión interna alimentados con hidrógeno no debe plantearse únicamente en términos de eficiencia media, sino también en función del perfil de carga de la aplicación. Mientras que las pilas de combustible presentan su mayor ventaja en usos variables o a carga parcial, los motores H₂-ICE mejoran su comportamiento relativo en condiciones de alta carga sostenida, hasta el punto de aproximarse e incluso superar a las pilas de combustible en determinadas aplicaciones muy intensivas, como maquinaria de construcción, minería o ciertos usos industriales. Este aspecto refuerza la idea de que ambas tecnologías no responden al mismo patrón operativo y que su adecuación depende en gran medida del tipo de misión, del régimen de funcionamiento y de la exigencia de potencia continua.

Asimismo, la comparación entre ambas rutas tecnológicas debe incorporar otros factores sistémicos y operativos. En primer lugar, los motores H₂-ICE presentan una mayor tolerancia a hidrógeno de menor pureza que las pilas de combustible, lo que podría tener implicaciones económicas en la cadena de suministro; sin embargo, esta diferencia no es neutra, ya que un sistema diseñado para abastecer motores con estándares de pureza inferiores podría no ser apto para vehículos de pila de combustible, condicionando la interoperabilidad del ecosistema.

En segundo lugar, la menor eficiencia del H₂-ICE no solo penaliza el consumo específico de hidrógeno, sino que también exige una mayor capacidad de almacenamiento a bordo para alcanzar autonomías equivalentes, con impacto potencial sobre el dimensionamiento de depósitos, el volumen ocupado y la carga útil disponible.

Finalmente, desde la perspectiva del ciclo de vida, los motores de combustión presentan una trayectoria de degradación más conocida y previsiblemente menos sensible en términos de eficiencia, mientras que las pilas de combustible pueden requerir reacondicionamiento del stack a lo largo de la vida útil, un aspecto particularmente relevante en flotas de uso intensivo o con ciclos de operación prolongados. En conjunto, estos elementos refuerzan la complementariedad entre ambas tecnologías y justifican su evaluación en función del caso de uso, más que desde una comparación simplificada basada exclusivamente en la eficiencia nominal [1].

2.4. Madurez de las diferentes tecnologías

El grado de madurez de las tecnologías asociadas a la movilidad basada en hidrógeno puede evaluarse mediante el indicador **TRL (Technology Readiness Level)**, ampliamente utilizado para determinar el nivel de desarrollo y la proximidad al despliegue comercial de una tecnología. Esta escala, que abarca desde **TRL 1** (principios básicos observados) hasta **TRL 9** (sistema probado en condiciones operativas reales), permite comparar de forma homogénea el estado de desarrollo de distintas soluciones tecnológicas.

En este apartado, se analizan los niveles de madurez tecnológica de las principales tecnologías de propulsión basadas en hidrógeno aplicadas a la movilidad terrestre, concretamente la **pila de combustible** y el **motor de combustión interna alimentado con hidrógeno**. El análisis se realiza para diferentes tipologías de vehículo, incluyendo turismos (passenger car), vehículos comerciales ligeros (light commercial vehicle), autobuses urbanos (urban transit bus) y camiones (truck).

Los valores de TRL se han obtenido a partir de la base de datos tecnológica desarrollada por la Agencia Internacional de la Energía (IEA) [3], (Figura 7). En el caso de los **motores de combustión interna**, el mayor nivel de madurez se observa en el segmento de **camiones**, donde la tecnología alcanza un **TRL 8**. En el resto de las categorías, la tecnología presenta niveles de madurez ligeramente inferiores.

Por su parte, la tecnología de **pila de combustible** presenta un nivel de madurez homogéneo entre los distintos tipos de vehículo analizados, situándose todos los segmentos en un **TRL 9**. Este resultado indica que la **tecnología** está **plenamente probada** en entorno operativo real y con presencia en aplicaciones comerciales.

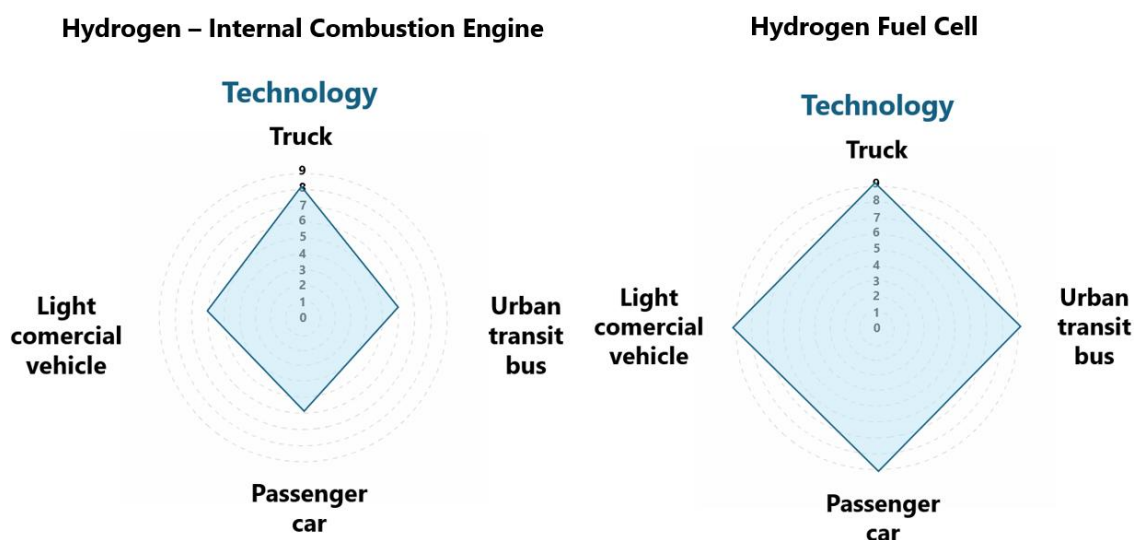


Figura 7.-Nivel de madurez de las distintas tecnologías. Fuente: IEA [3]

Estos resultados indican que la tecnología de pila de combustible ha alcanzado ya una fase de madurez tecnológica completa en el ámbito de la movilidad terrestre, mientras que los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno continúan avanzando hacia su plena validación comercial, especialmente en aplicaciones de transporte pesado. Ambas soluciones, presentan un elevado potencial de desarrollo y pueden desempeñar roles complementarios en la descarbonización del transporte, dependiendo de las necesidades operativas, los costes asociados y el desarrollo de la infraestructura de suministro de hidrógeno.

La evidencia reciente de proyectos y despliegues refuerza esta lectura de madurez tecnológica. En el caso de la **pila de combustible**, la evolución ya no se limita a prototipos aislados, sino que se apoya en demostraciones comerciales, primeras flotas operativas y proyectos orientados a la industrialización de componentes. En Europa, algunos proyectos como **H2Haul** [4] constituyen una referencia especialmente relevante, al contemplar el desarrollo y demostración de **16 camiones pesados de 26 a 44 toneladas** en operaciones comerciales reales, con nuevos vehículos adaptados a las necesidades del mercado europeo y acompañados por estaciones de repostaje de alta capacidad; además, en 2025 se había completado la construcción de los **12 vehículos Iveco** del consorcio y se habían acumulado ya **más de 15.000 km** en ensayos de validación y compatibilidad con las estaciones de repostaje del proyecto. A ello se suma **H2Accelerate TRUCKS** [5], iniciativa europea de gran escala financiada con alrededor de **30 millones de euros** por la Clean Hydrogen Partnership, cuyo objetivo es desplegar **125 camiones de hidrógeno de 41 a 44 toneladas** en **seis países europeos** antes de 2030, contribuyendo al

paso desde la demostración hacia el pre-despliegue comercial. A ello se suma el ecosistema suizo impulsado por **Hydrospider** [6], centrado en la producción y distribución de **hidrógeno verde** para transporte pesado y articulado con una cadena de valor real que conecta generación renovable, suministro y operación de flotas. Este modelo ha contribuido a consolidar en Suiza una experiencia especialmente valiosa de movilidad pesada con hidrógeno, apoyada además por una red nacional de repostaje ya operativa. En paralelo, la madurez del ecosistema tecnológico se ve reforzada por proyectos como **StasHH** [7], centrado en el desarrollo de un **estándar abierto europeo para módulos de pila de combustible de servicio pesado** en tamaño, interfaces, control y protocolos de ensayo, o **IMMORTAL** [8], orientado al desarrollo de membranas (**MEA**) **de alta densidad de potencia y durabilidad** para aplicaciones pesadas.

Fuera de Europa, la madurez de la pila de combustible también se apoya en avances recientes de escala y operación real. En **China**, a cierre de **2025** se contabilizaban **casi 40.000 vehículos de pila de combustible**, lo que confirma la existencia de una base material relevante para su despliegue [9]. En **Corea del Sur**, Hyundai ha reforzado esta lectura con su programa de camiones pesados **XCIENT Fuel Cell**, que había superado los **20 millones de kilómetros acumulados en Europa** en enero de **2026**, evidenciando un grado significativo de validación operativa [10]. En **Japón**, la consolidación se refleja tanto en la política industrial como en la evolución tecnológica: Toyota presentó su **tercera generación** de sistema de pila de combustible para aplicaciones comerciales y, junto con Isuzu, anunció en **2026** el desarrollo del **primer camión ligero de pila de combustible producido en serie en Japón** [11].

Por su parte, en el ámbito del **motor de combustión interna alimentado con hidrógeno (H₂-ICE)**, empresas como **Volvo** han iniciado en 2026 pruebas en carretera de camiones pesados impulsados por motores de hidrógeno y mantienen el objetivo de lanzamiento comercial en Europa antes de 2030 [12]. A ello se suma **MAN**, que ha llevado esta vía un paso más allá con el **MAN hTGX**, una serie corta de camiones pesados de combustión de hidrógeno ya entregada a clientes en **2025** en varios mercados europeos. El vehículo ofrece **hasta 600 km de autonomía**, repostaje en **menos de 15 minutos** y motorización específica **H45** de **520 CV** y **2.500 Nm** [13]. En paralelo, **Cummins** continúa desarrollando la cadena de valor de esta solución mediante proyectos específicos de mejora de rendimiento y durabilidad, como **Project Brunel**, y con la introducción en 2025 de **turboalimentadores específicamente diseñados para motores H₂-ICE de carretera**, lo que evidencia un avance desde la adaptación conceptual hacia la industrialización de componentes dedicados [14]. En maquinaria y aplicaciones off-road, **JCB** ha desarrollado más de **130 motores de evaluación** y ha obtenido en 2025 la **homologación completa de tipo en la UE** para su motor de combustión de hidrógeno, destinado a

retroexcavadoras, manipuladoras telescópicas y grupos electrógenos [15]. En esta misma línea, **DEUTZ** ha consolidado una propuesta industrial propia con su motor **TCG 7.8 H2**, que en **2025** se convirtió en el **primer motor de combustión de hidrógeno certificado conforme a la norma EU Stage V** y entró en **producción en serie** en su planta de Colonia-Porz [16].

3. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN VEHÍCULOS

El **sistema de almacenamiento de hidrógeno** constituye un elemento crítico en la arquitectura de los vehículos basados en pila de combustible (FCEV) y en los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno (H₂-ICE).

A diferencia de los combustibles líquidos convencionales, el hidrógeno presenta **baja densidad energética volumétrica** en condiciones ambientales, lo que obliga a emplear soluciones tecnológicas de almacenamiento que mantengan un equilibrio adecuado entre **autonomía, seguridad, masa, coste e integración vehicular**.

La Figura 8 presenta la densidad energética de las diferentes formas de almacenar hidrógeno para su uso posterior. En la Tabla 4 se muestra la diferencia de densidad energética (poder calorífico) de los principales combustibles utilizados en movilidad y la del hidrógeno. Al ser una referencia en peso, todos los sistemas de almacenamiento de hidrógeno tienen el mismo contenido energético, independientemente de su estado físico.

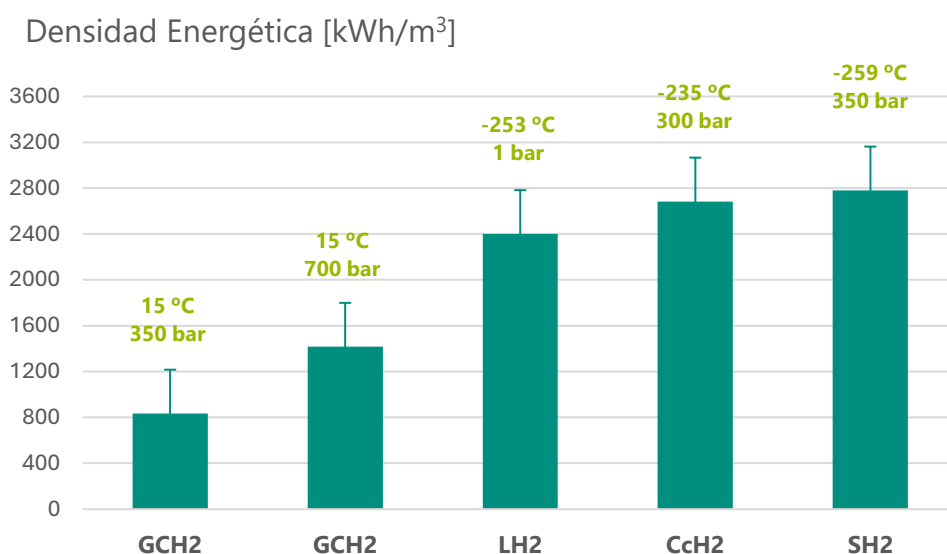


Figura 8.- Densidad energética de las distintas formas de almacenamiento del hidrógeno.

Tabla 4.- Poder calorífico de combustibles convencionales vs. Hidrógeno [17].

Combustible	Poder calorífico inferior (MJ/kg)
Gasolina	43,2
Diésel	43,1
Diésel sintético (FT/HVO)	44
H ₂	120

En aplicaciones vehiculares, el hidrógeno se almacena principalmente en forma de **gas comprimido** o como **hidrógeno licuado**. Existen, además, tecnologías emergentes de almacenamiento, como el almacenamiento crio-comprimido, hidruros metálicos, portadores orgánicos líquidos (LOHC) o adsorbentes, que presentan un grado de madurez más limitado o se encuentran en fases tempranas de desarrollo.

3.1. Requisitos generales del almacenamiento vehicular de hidrógeno

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno para automoción deben cumplir simultáneamente los siguientes requisitos:

- Alta densidad energética gravimétrica y volumétrica, maximizando la autonomía.
- Seguridad intrínseca y funcional, garantizando resistencia a impactos, sobrepresión y fugas, con modos de fallo controlados.
- Compatibilidad con ciclos de repostaje rápidos, soportando ciclos repetidos de presurización y variaciones térmicas sin degradación acelerada.
- Durabilidad estructural, con resistencia a fatiga, vibraciones y condiciones ambientales (temperatura, humedad, corrosión, fragilización).
- Integración con el vehículo, incluyendo gestión del espacio, distribución de masas y cumplimiento de requisitos de crash management.
- Cumplimiento de normativa internacional y de homologación, aplicables a diseño, materiales y seguridad.

Estos requisitos condicionan tanto la geometría y composición de los depósitos como los elementos auxiliares del sistema (válvulas, sensores, reguladores, protecciones térmicas).

3.2. Almacenamiento de hidrógeno gaseoso a alta presión (cH2)

El almacenamiento de **hidrógeno gaseoso** comprimido constituye hoy la tecnología dominante en aplicaciones de movilidad. El hidrógeno se almacena dentro de depósitos presurizados y se suministra al sistema de propulsión mediante una cadena de regulación y seguridad.

3.2.1. Principio de almacenamiento

El hidrógeno se almacena en estado gaseoso dentro de **depósitos presurizados**. El suministro de hidrógeno hacia el vehículo durante el repostaje se basa en la **diferencia de presión** entre el sistema de almacenamiento de la estación y el depósito del vehículo. Las presiones típicas en movilidad terrestre son:

- **350 bar**. Habitual en **transporte pesado**, autobuses y aplicaciones industriales.
- **700 bar**. Estándar en **vehículos ligeros**, con tendencia creciente hacia su uso en transporte pesado para ofrecer mayores autonomías.

3.2.2. Tipologías de depósitos presurizados

Actualmente se emplean cuatro tipos de depósitos, clasificados en función de los materiales utilizados y de la presión de almacenamiento, como se muestra en la **Tabla 5**. Existe un quinto tipo en fase de desarrollo, cuyo objetivo es combinar las ventajas del Tipo III y del Tipo IV.

Tabla 5.- Tipos de tanques de hidrógeno comprimido (Lean Hydrogen, 2025) [18].

Tipo	Material principal	Presión máxima (bar)	Densidad energética (kWh/kg)	Aplicación típica	Normativa ISO
I	Acero o aluminio (100% metálico)	200-250	~0,5	Estaciones de repostaje	ISO 9809 [19]
II	Metal + envoltura parcial (fibra de vidrio/carbono)	1.000	~0,9	Estaciones de repostaje	ISO 11119-1 [20]
III	Liner metálico (aluminio) + fibra de carbono total	700	~1,5	Movilidad pesada, trenes, estaciones de repostaje	ISO 11119-2 [21]
IV	Liner polimérico + fibra de carbono total	700	~2	Turismos, autobuses y camiones, estaciones de repostaje	ISO 11119-3 [22]
V	(En desarrollo)	>700	>2	Futuro: aviación, drones...	En desarrollo

El **Tipo IV** es el más utilizado en automoción debido a su **baja masa**, elevada resistencia y características favorables para integración. En contraparte, su coste está directamente ligado a la fibra de carbono, al proceso de bobinado y al control de calidad.

3.2.3. Componentes del sistema de almacenamiento en el vehículo

Un sistema completo de almacenamiento a alta presión incluye, además del propio **depósito**, un conjunto de elementos de seguridad y control del sistema, según se observan en la Figura 9. Estos elementos garantizan un funcionamiento seguro bajo múltiples condiciones operativas. Entre ellos se encuentran:

- Válvulas de corte automático
- Dispositivos de alivio de presión activados térmicamente (TPRD)
- Sensores de presión y temperatura
- Reguladores y líneas de alta presión
- Sistemas de detección de fugas
- Sistemas de comunicación con la estación de repostaje
- Unidad de control del almacenamiento (HSCU)

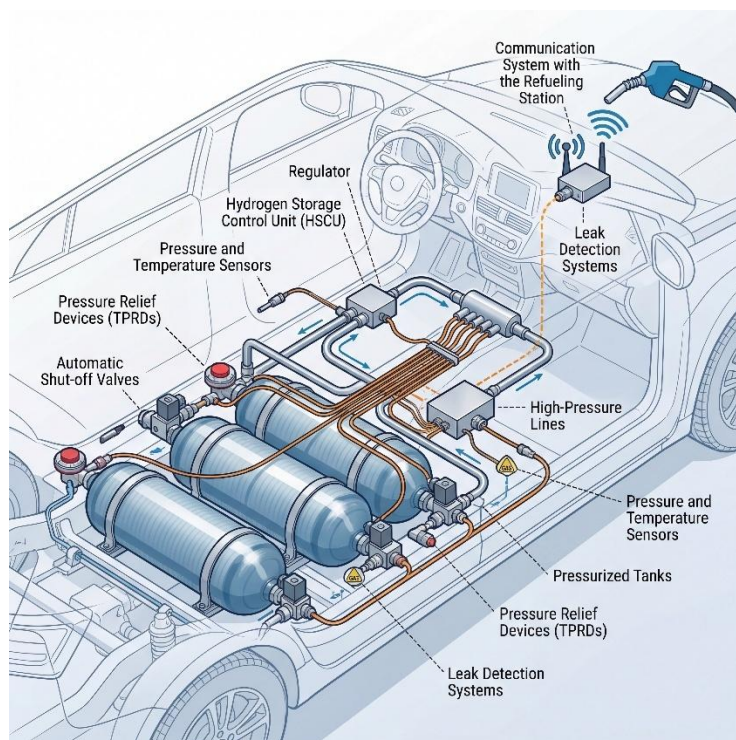


Figura 9.- Componentes del sistema de almacenamiento
Fuente: Elaboración propia

3.2.4. Seguridad del almacenamiento a alta presión en vehículos

La **seguridad** es un aspecto central que se aborda desde el **diseño** (seguridad intrínseca) y desde la **funcionalidad**. En el ámbito de la homologación, estos sistemas deben superar ensayos exigentes que verifiquen su integridad estructural y su comportamiento en condiciones adversas:

- Resistencia a impactos y perforaciones (ensayos individuales y crash tests vehiculares). Se aplican golpes controlados sobre el tanque para comprobar que no se producen fugas y posteriormente se simula un impacto penetrante para verificar que no falla de forma explosiva.
- Pruebas de fuego (fire test). Estas tratan de evaluar la integridad del tanque durante un tiempo determinado, comprobando que los dispositivos de alivio actúan correctamente y que la liberación de hidrógeno se produce de forma segura.
- Ensayos de fatiga por ciclos de presión. Reproducen varios ciclos de llenado y vaciado para comprobar que el material y las uniones no desarrollan grietas ni degradación estructural.
- Gestión de ventilación y direccionamiento del alivio para evitar acumulaciones peligrosas. Análisis de cómo se dispersa el hidrógeno en caso de liberación imprevista.

Los sistemas están diseñados para **fallar de forma controlada**, liberando hidrógeno verticalmente y evitando acumulaciones que puedan producir mezclas explosivas.

3.2.5. Ventajas y limitaciones

A continuación, se indican las principales **ventajas** del almacenamiento de hidrógeno gaseoso a alta presión:

- Tecnología madura, certificada y ampliamente industrializada
- Repostaje rápido, comparable a combustibles líquidos
- Flexibilidad de integración en distintas plataformas vehiculares

A su vez, el almacenamiento de hidrógeno gaseoso a alta presión presenta algunas **limitaciones**:

- Baja densidad volumétrica de energía incluso a 700 bar, el volumen requerido es elevado frente a combustibles líquidos
- Coste elevado del material compuesto y de la fabricación de depósitos

- Impacto en el diseño del chasis del vehículo y la habitabilidad (con la necesidad añadida de proteger depósitos y líneas frente a golpes)

3.3. Almacenamiento de hidrógeno líquido (LH₂)

El almacenamiento de hidrógeno licuado constituye una alternativa al almacenamiento en forma de gas comprimido.

3.3.1. Principio de almacenamiento criogénico

El hidrógeno se enfría hasta temperaturas criogénicas, próximas a su punto de ebullición (**-253 °C** a 1 bar de presión), lo que **incrementa** notablemente su **densidad volumétrica** muy superior a la del gas comprimido. Esto permite reducir el volumen del sistema de almacenamiento para una misma cantidad de energía almacenada, pero implica utilizar depósitos con un alto grado de aislamiento térmico y un consumo energético en el proceso de licuación cercano al 30% del contenido energético del propio hidrógeno con la tecnología actual [23].

El almacenamiento de hidrógeno licuado introduce una **complejidad técnica** considerable. Los **tanques criogénicos** requieren sistemas de **aislamiento** avanzados para minimizar las pérdidas por evaporación y garantizar la seguridad del sistema. Estos tanques son costosos, aumentan el peso del vehículo y requieren una infraestructura específica tanto para el repostaje como para el manejo del combustible dentro del vehículo.

El hidrógeno se ha de mantener a presión cercana a la atmosférica, aunque, la **presión de diseño** del depósito puede llegar a 4 o incluso 8,5 bar para gestionar el aumento de presión que puede producir la evaporación (boil-off) del hidrógeno líquido debido a los aportes de calor externo.

3.3.2. Características técnicas

- Los **depósitos criogénicos** están constituidos por un **tanque interior** y otro **exterior**, con vacío entre ambos y un material aislante, con el fin de minimizar el aporte de calor externo que pueda producir evaporación del hidrógeno.
- **Gestión de evaporación** (boil-off): el calor externo provoca la vaporización progresiva del LH₂, elevando la presión interna.
- Se requieren **sistemas específicos** de ventilación, alivio y seguridad, con estrategias definidas para limitar pérdidas y mantener condiciones seguras el depósito.

3.3.3. Ventajas y limitaciones

A continuación, se indican algunas **ventajas** del almacenamiento de hidrógeno líquido:

- Alta densidad energética volumétrica
- Autonomías superiores, especialmente interesante en transporte pesado

A su vez, el almacenamiento de hidrógeno líquido presenta algunas **limitaciones**:

- Complejidad técnica elevada
- Pérdidas por evaporación
- Infraestructura de repostaje limitada
- Costes energéticos altos asociados a la licuefacción

Al tratarse de una **tecnología emergente**, su implantación comercial se limita a casos piloto de largo recorrido

3.3.4. Almacenamiento subenfriado

Una variante del hidrógeno líquido es el almacenamiento subenfriado, el cual consiste en mantener el hidrógeno en estado líquido a una temperatura **inferior a su punto normal de ebullición** ($\approx 20,3$ K a 1 bar), pero **sin llegar a solidificarlo**. Al subenfriarlo, el hidrógeno líquido **aumenta su densidad** y **reduce su presión de vapor**, lo que permite almacenar algo más de masa en el mismo volumen y disminuir las pérdidas por evaporación (*boil-off*) frente al hidrógeno líquido convencional. Algunos ensayos indican incrementos de densidad del orden del 7-10% al trabajar por debajo del punto normal de ebullición, aunque esta solución exige refrigeración adicional, aislamiento térmico muy exigente y mayor complejidad del sistema.

3.4. Almacenamiento crio-comprimido

Otra alternativa para el almacenamiento de hidrógeno es combinar **bajas temperaturas** (criogénico) y **alta presión** para lograr una densidad energética superior a la del hidrógeno líquido o gaseoso comprimido por separado.

El almacenamiento crio-comprimido combina temperaturas criogénicas moderadas y presiones elevadas (≈ 300 bar, ≈ 38 K (-235 °C)), alcanzando densidades (~ 80 g/L frente a 70 g/l del hidrógeno líquido).

Es una tecnología todavía en **desarrollo**.

3.5. Almacenamiento en materiales sólidos

El almacenamiento de hidrógeno utilizando **materiales sólidos** más desarrollado en la actualidad es el basado en **hidruros metálicos**, el cual constituye una alternativa tecnológica consolidada desde el punto de vista científico. Si bien, su adopción en aplicaciones de movilidad, tanto ligera como pesada, es actualmente limitada.

Su uso se restringe principalmente a nichos específicos, como ciertas soluciones de micromovilidad (por ejemplo, bicicletas propulsadas por hidrógeno), donde los requerimientos de autonomía, peso y dinámica de operación son menos exigentes.

Desde una perspectiva técnica, los hidruros metálicos presentan una serie de **ventajas**:

- Elevada densidad volumétrica de almacenamiento, que puede alcanzar valores comparables a los del hidrógeno comprimido a presiones del orden de 1000 bar.
- Alto nivel de seguridad intrínseca, ya que el hidrógeno se almacena en forma sólida dentro de la red cristalina del material, operando a presiones relativamente bajas (típicamente por debajo de 35 bar en condiciones de funcionamiento, y significativamente menores en reposo) [24]. Esta característica reduce de forma notable los riesgos asociados a fugas o fallos estructurales en comparación con sistemas de almacenamiento a alta presión.

No obstante, existen **limitaciones** estructurales que condicionan su competitividad en aplicaciones móviles:

- Baja densidad gravimétrica de hidrógeno en las aleaciones (habitualmente en torno al 1,5% en peso) implica una penalización significativa en términos de masa del sistema. En términos prácticos, el almacenamiento de 1 kg de hidrógeno puede requerir sistemas con masas del orden de 100 kg, lo cual resulta incompatible con los requisitos de eficiencia y carga útil en la mayoría de los vehículos.
- La gestión térmica del sistema constituye un desafío relevante. El proceso de absorción de hidrógeno en el hidruro es exotérmico, mientras que la desorción es endotérmica. Esto implica que, durante la descarga, es necesario suministrar calor al sistema para garantizar caudales adecuados de hidrógeno, especialmente en aplicaciones que demandan altas tasas de suministro o presiones elevadas en la línea de salida. Este requisito introduce complejidad adicional en el diseño del sistema, tanto a nivel de integración térmica como de control operativo.

Como consecuencia de estos factores, los **hidruros metálicos no** se consideran, en el estado actual de la tecnología, una **solución competitiva** para el **almacenamiento** a bordo en **vehículos** de carretera. En su lugar, tecnologías como el hidrógeno comprimido a alta presión (350 o 700 bar) dominan el desarrollo industrial en movilidad.

3.6. Integración del almacenamiento en el vehículo

La integración del almacenamiento de hidrógeno en vehículos terrestres es un aspecto crítico de diseño, ya que condiciona la **distribución de masas, el centro de gravedad, el espacio útil y la propia arquitectura del bastidor**.

En el caso del **hidrógeno comprimido**, los recipientes de alta presión ocupan un volumen relevante y su ubicación debe resolverse junto con los requisitos de seguridad, ventilación y resistencia del sistema:

- En **turismos**, la integración de los depósitos se orienta habitualmente a zonas bajas de la carrocería, especialmente **bajo el piso**, con el objetivo de reducir el centro de gravedad y limitar la pérdida de habitabilidad y volumen de carga. Un ejemplo representativo es el **Toyota Mirai**, cuya documentación técnica oficial [25] indica que los depósitos se disponen en una configuración en “T”, con un tanque principal bajo el piso y otros situados bajo los asientos traseros y la zona de equipaje; Toyota señala además que esta disposición contribuye a un centro de gravedad más bajo y evita comprometer el espacio útil. Se emplean tanques de 700 bar, enfoque en volumen y seguridad pasiva.
- En **autobuses urbanos**, la configuración más habitual es la instalación de los depósitos **en techo**, ya que esta solución permite conservar el piso bajo y no penalizar el espacio para pasajeros. Esta disposición se puede observar en autobuses como el **Solaris Urbino 12 hydrogen** [26]. De la misma forma que en los vehículos de transporte de mercancías, se suelen emplear tanques de 350 bar. En el caso de camiones, la integración de los depósitos es variable, y pueden situarse en la parte posterior de la cabina, y/o en el propio chasis.

3.7. Normativa y homologación

El almacenamiento de hidrógeno en vehículos está regulado por **normas internacionales**. Las principales se listan a continuación:

- **UNECE R134**: requisitos específicos para sistemas de almacenamiento de hidrógeno [27]. Establece requisitos para el sistema de combustible del vehículo, incluyendo el sistema

de almacenamiento comprimido, tuberías, uniones y componentes en presencia de hidrógeno

- **ISO 19881**: enfocada en depósitos de hidrógeno gaseoso [28]
- **ISO 11114**: ligada con materiales compatibles con hidrógeno [20] [21]
- **Reglamentos europeos de homologación de vehículos** [29]

El cumplimiento de estas normas es obligatorio para la **matriculación y comercialización** de vehículos de hidrógeno.

3.8. Tendencias y vías de desarrollo

El almacenamiento de hidrógeno a bordo de los vehículos tiene todavía vía de desarrollo. A continuación, se listan algunas de las tendencias tecnológicas y líneas de evolución en esta materia:

- Reducción del uso de fibra de carbono
- Optimización de diseño multicelda
- Integración estructural de depósitos
- Implantación del almacenamiento en cantidades superiores a las habituales en 700 bar para transporte pesado
- Desarrollo de LH₂ para transporte pesado.
- Investigación en almacenamiento sólido híbrido

4. TECNOLOGÍAS DE REPOSTAJE DE HIDRÓGENO

El **repostaje de hidrógeno** es el eslabón que conecta la **producción** y el **almacenamiento** con el **uso final** en el vehículo, y condiciona de forma directa la experiencia de usuario, la disponibilidad operativa de las flotas y la viabilidad económica de la movilidad con hidrógeno. Desde el punto de vista de la cadena de valor, la estación de servicio actúa como interfaz entre las infraestructuras de producción, acondicionamiento, transporte y almacenamiento de hidrógeno y los diferentes vectores de demanda (turismos, autobuses, camiones, trenes).

El **diseño de la estación** de repostaje influye de manera crítica en parámetros como el tiempo de repostaje de los vehículos, la capacidad de suministro (kg/h), la eficiencia energética del sistema y la disponibilidad operativa, aspectos especialmente relevantes en aplicaciones de transporte pesado y uso intensivo.

En función de la forma de aprovisionamiento del hidrógeno a la estación y el tipo de hidrógeno a suministrar a vehículos, pueden distinguirse tres configuraciones principales de **tecnologías de repostaje de hidrógeno**:

- Estaciones de repostaje de **hidrógeno comprimido** alimentadas con **hidrógeno gas**
($cH_2 \rightarrow cH_2$)
- Estaciones de repostaje de **hidrógeno comprimido** alimentadas con **hidrógeno líquido**
($LH_2 \rightarrow cH_2$)
- Estaciones de repostaje **líquido** “on-board” ($LH_2 \rightarrow LH_2$)

Con relación a esta última, existen soluciones históricas de repostaje de hidrógeno, pero el desarrollo tecnológico y los trabajos de normalización actuales se orientan mayoritariamente hacia arquitecturas de **hidrógeno líquido subenfriado** (sLH₂) almacenado a bordo del vehículo especialmente para aplicaciones de transporte pesado de largo recorrido. Los sistemas sLH₂ permiten reducir las pérdidas por evaporación (*boil-off*), mejorar la estabilidad del proceso de llenado y habilitar caudales elevados compatibles con aplicaciones de transporte pesado.

La **Figura 10** recoge esquemáticamente las **principales arquitecturas tecnológicas** de estaciones de repostaje de hidrógeno en función del estado del hidrógeno a lo largo de la cadena estación-vehículo. Se distingue entre: soluciones basadas en hidrógeno gaseoso, soluciones basadas en hidrógeno líquido, como vector logístico para repostaje gaseoso, y soluciones de repostaje líquido para vehículos con almacenamiento criogénico a bordo.

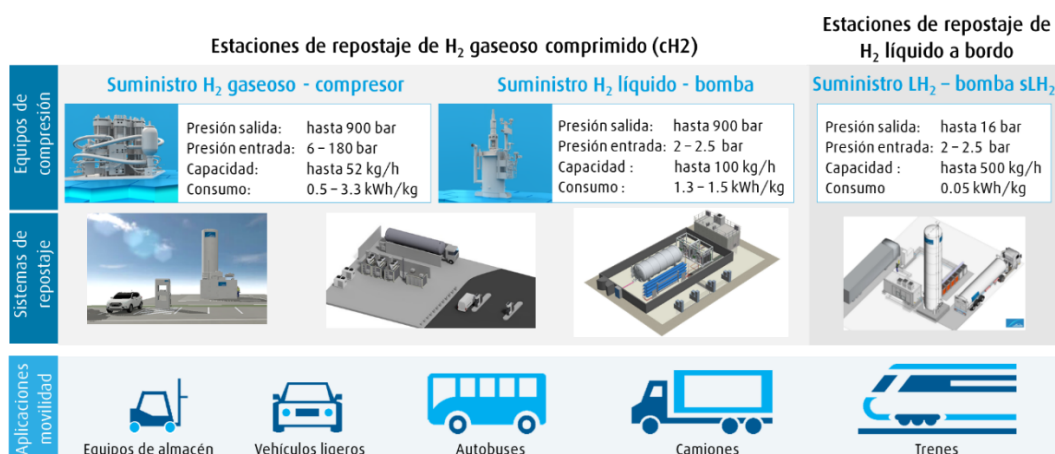


Figura 10.- Arquitecturas de estaciones de repostaje de hidrógeno según estado del combustible: Fuente: Linde, 2026

4.1. Estaciones de cH₂ alimentadas con hidrógeno gaseoso (cH₂ → cH₂)

El **hidrógeno comprimido** (cH₂) constituye la opción **más extendida** en las estaciones de repostaje para movilidad por carretera, tanto en vehículos ligeros como en aplicaciones de transporte pesado. El hidrógeno se **suministra al vehículo a alta presión** (350 bar o 700 bar), cumpliendo protocolos normalizados que garantizan la seguridad de la operación, y tiempos de llenado comparables a los combustibles convencionales.

Esta configuración representa la solución más madura y extendida comercialmente, especialmente en **fases iniciales de despliegue** de infraestructura, debido a su compatibilidad directa con la mayoría de los vehículos actualmente en operación.

En una estación de cH₂ alimentada con hidrógeno gaseoso, el hidrógeno llega en fase gaseosa, ya sea desde un electrolizador in situ, por conexión a una red de transporte o distribución o mediante elementos que permiten transportar el hidrógeno por carretera a altas presiones, como bloques de botellas, *semitrailers* o *tube trailers*.

El núcleo de la estación es el **sistema de compresión** de alta presión, que eleva la presión de recepción del hidrógeno hasta los niveles requeridos para su almacenamiento y posterior dispensación. Las tecnologías de compresión más habituales incluyen compresores de pistón, de membrana y, más recientemente, compresores de líquido iónico y compresores electroquímicos, cada uno con diferentes compromisos en términos de eficiencia, mantenimiento y coste. En sistemas comerciales de compresores de líquido iónico de última generación (como los de Linde) permiten comprimir hidrógeno con presiones de salida de hasta 900 bar, con consumos específicos del orden de 0,5-3,3 kWh/kg en función de la presión de entrada.

Tras la compresión, el **hidrógeno se almacena** en bloques de botellas de alta presión organizados por rangos o etapas de presión, de tal forma que el suministro a los vehículos se realiza trasvasando el hidrógeno ya comprimido y almacenado en los bloques de botellas de la estación al tanque del vehículo por simple diferencia de presiones. El almacenamiento del hidrógeno comprimido permite realizar repostajes rápidos sin sobrecargar el compresor en tiempo real. Este esquema de almacenamiento es esencial para desacoplar la compresión del proceso de repostaje, permitiendo reducir la potencia instalada de compresión y mejorar la respuesta ante demandas punta. Adicionalmente, la utilización de distintos rangos o etapas de presión para el almacenamiento y su gestión secuencial en el momento del suministro aumenta la eficiencia de todo el proceso de compresión y de repostaje. El suministro al vehículo se realiza siempre en forma de **hidrógeno gaseoso comprimido**, a través de dispensadores equipados con mangueras y boquereles normalizados, sistemas de medición certificados y control de temperatura para respetar los protocolos de llenado (H35/H70¹).

Como se verá posteriormente con más detalle, para mantener la seguridad de las operaciones y aumentar la velocidad de repostaje, en las **estaciones de repostaje de hidrógeno**, se tiende a instalar unidades de **refrigeración** que permiten preenfriar el gas hasta temperaturas del orden de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ antes del surtidor, con el fin de cumplir los límites de temperatura en tanque definidos por los protocolos internacionales².

Los sistemas que componen una instalación de este tipo son:

4.1.1. Aprovechamiento de hidrógeno a la estación

La elección del **modo de aprovisionamiento** influye en el diseño de la estación, especialmente en términos de presión de entrada, continuidad de suministro y costes operativos:

- **Electrólisis in situ:** genera hidrógeno a baja presión, requiriendo mayor compresión
- **Tubería de transporte o distribución:** es un suministro continuo y estable
- **Tube-trailers:** suministro flexible, presiones típicamente superiores a las del electrolizador y la tubería, pero dependiente de logística externa

En todos los casos se requiere un sistema de **regulación** y **acondicionamiento** que adapte la presión de entrada al sistema de compresión.

¹ H35 se refiere a una presión de suministro de hidrógeno de 35MPa/350 bar. H70 se refiere a una presión de suministro de hidrógeno de 70MPa/700 bar [32].

² El hidrógeno se calienta al reducir su presión, al contrario que la mayoría de los gases.

4.1.2. Sistema de compresión de hidrógeno

El **sistema de compresión** está compuesto por uno o varios compresores, con los que se eleva la presión del hidrógeno procedente del aprovisionamiento, hasta la presión definida para su almacenamiento en el sistema de almacenamiento de hidrógeno.

Los compresores más utilizados para este tipo de aplicaciones son los siguientes:

- **Pistón:** tecnología madura, robusta y ampliamente disponible
- **Membrana:** alta pureza y estanqueidad, adecuada para movilidad
- **Líquido iónico:** tecnología emergente con menor desgaste mecánico y mejoras en eficiencia y operación, especialmente en configuraciones con producción in situ.
- Compresor electroquímico: otra tecnología emergente con también menores desgastes mecánicos y mejoras en eficiencia y operación.

Las características de las distintas tecnologías de compresión se resumen en la **Tabla 6** a partir de fuentes técnicas del sector, incluyendo estudios de NREL [30] y documentación industrial.

Tabla 6.- Características de las tecnologías de compresión en estaciones de repostaje CH₂

Tecnología	Ventajas	Limitaciones	Uso típico en HRS
Compresor de pistón	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología madura y ampliamente disponible • Capaz de alcanzar altas presiones • Coste de inversión relativamente bajo • Robusto para múltiples aplicaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor desgaste mecánico (muchas partes móviles) • Mantenimiento frecuente (válvulas, sellos) • Riesgo de contaminación del gas (lubricantes) • Vibraciones y ruido elevados 	<ul style="list-style-type: none"> • Estaciones convencionales • Aplicaciones generalistas • Casos con CAPEX limitado
Compresor de membrana	<ul style="list-style-type: none"> • Alta pureza del hidrógeno (sin contacto con lubricantes) • Excelente estanqueidad • Adecuado para aplicaciones sensibles (movilidad, H₂ alta calidad) • Buen rendimiento a altas presiones 	<ul style="list-style-type: none"> • Coste CAPEX más elevado • Limitación de caudal (menos adecuado para grandes estaciones) • Fatiga de membrana → mantenimiento periódico • Complejidad mecánica 	<ul style="list-style-type: none"> • HRS de alta pureza • Aplicaciones donde la calidad del gas es crítica • Estaciones de tamaño medio

Compresor de líquido iónico	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia energética • Menor desgaste mecánico (menos fricción) • Buena capacidad para altas presiones • Operación más silenciosa y estable • Potencial menor coste OPEX 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología menos madura (menor track record) • CAPEX más elevado • Dependencia de proveedor/tecnología específica 	<ul style="list-style-type: none"> • Estaciones avanzadas • Integración con electrólisis (baja presión de entrada) • Proyectos de nueva generación / alta eficiencia
Compresor electroquímico	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia energética. • Ausencia de elementos móviles. • Integra la purificación del hidrógeno en el proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología en maduración. • Dependencia de proveedor/tecnología específica 	<ul style="list-style-type: none"> • Estaciones de gran capacidad

Debido a las limitaciones de caudal y potencia de los compresores, el hidrógeno no se suministra directamente desde el compresor al vehículo, sino a través del sistema de **almacenamiento intermedio**, descrito más adelante. Su dimensionamiento dependerá de la tipología de hidrógeno a suministrar (350 o 700 bar), y de la demanda de hidrógeno a atender.

4.1.3. Sistema de almacenamiento de hidrógeno

El **sistema de almacenamiento intermedio** almacena el hidrógeno a una presión tal que éste pueda ser suministrado directamente, por **diferencia de presión**, a los vehículos. Existen dos niveles de presión máxima de trabajo para estos sistemas, en función la presión de hidrógeno comprimido a suministrar:

- **Suministro de hidrógeno a 350 bar:** el sistema de almacenamiento opera típicamente a presiones máximas del orden de 450-500 bar.
- **Suministro de hidrógeno a 700 bar:** el sistema de almacenamiento opera típicamente a presiones máximas del orden de 900-1.000 bar.

El sistema de almacenamiento de hidrógeno está compuesto por un conjunto de recipientes a presión, agrupados en bancos organizados en diferentes niveles o etapas de presión, configurando un sistema de **almacenamiento en cascada**. Habitualmente, se utilizan 2 o 3 niveles

de presión. Esta estrategia de almacenamiento en diferentes etapas de presión permite aumentar la eficiencia de la estación tanto en CAPEX como en OPEX.

Por un lado, trabajar con el almacenamiento en cascada, permite diseñar parte del almacenamiento a presiones inferiores a las máximas necesarias (con eficiencia en CAPEX). Por otro lado, el sistema de compresión no necesita llenar todo el almacenamiento a las presiones máximas de trabajo del almacenamiento (con eficiencia en OPEX).

El dimensionamiento del almacenamiento es un factor crítico, ya que condiciona la capacidad de la estación para atender repostajes consecutivos (*back-to-back*) y cubrir picos de demanda. Asimismo, el sistema de almacenamiento tiene un impacto directo en el CAPEX de la estación y en su capacidad operativa global.

4.1.4. Sistema surtidor de hidrógeno

El proceso de **suministro de hidrógeno** a vehículos se efectúa conectando el sistema de almacenamiento de la estación con el tanque del vehículo. Al estar el hidrógeno en el sistema de almacenamiento a una presión superior que la del tanque del vehículo, el hidrógeno fluye por **diferencia de presión**.

El surtidor de hidrógeno es el equipo que interconecta el vehículo con la instalación, y que se encarga de **controlar** esa **transferencia de hidrógeno** del sistema de almacenamiento de la estación hacia el tanque del vehículo.

Desde un punto de vista operativo, los principales **parámetros a controlar** son los siguientes:

- Evitar el sobrellenado de los tanques de los vehículos, asegurando que la presión de llenado del tanque del vehículo no supere la presión objetivo (350 bar o 700 bar).
- Evitar el aumento de temperatura del hidrógeno por encima de los niveles admisibles del tanque del vehículo, debido a los efectos de calentamiento que sufre el hidrógeno durante el repostaje.
- Efectuar el proceso en el menor tiempo posible.

Este proceso está gobernado por **protocolos de llenado normalizados** (como SAE J2601) [31], que ajustan dinámicamente las condiciones de suministro en función del estado del tanque del vehículo. En particular, el surtidor regula de forma continua el caudal, la presión y la temperatura del hidrógeno durante el repostaje, garantizando tanto la seguridad como la eficiencia del proceso.

Las geometrías de conexión (boquilla y receptáculo) están definidas por la familia de normas ISO 17268 [32] para presiones de 350 y 700 bar, mientras que el comportamiento dinámico del llenado se rige por protocolos como SAE J2601 para vehículos ligeros y sus extensiones para servicio pesado. En paralelo, se están desarrollando **nuevas normas** orientadas a aplicaciones de alto caudal y repostaje rápido dinámico, incluyendo soluciones basadas en comunicación entre estación y vehículo.

Respecto a la velocidad de llenado de los depósitos, flujo más habitual que se puede llegar a conseguir en la actualidad es de 60 g/s (216 kg/h), pero ya existen dispositivos capaces de suministrar el hidrógeno a un mayor flujo, 90 a 120 g/s, estando en desarrollo tecnologías que permitirán 300 g/s [33] [34]. Estos caudales requieren en cualquier caso de sistema de preenfriamiento del hidrógeno.

Asimismo, las estaciones deben garantizar la **calidad del hidrógeno** suministrado conforme a la norma ISO 14687 [35] o UNE-EN 17124 [36], lo que implica estrictos requisitos en términos de pureza, control de contaminantes y procedimientos de muestreo. Adicionalmente, el surtidor incorpora sistemas de medición certificados, control de flujo y enclavamientos de seguridad, garantizando la interoperabilidad entre estaciones y vehículos de distintos fabricantes.

4.1.5. Sistema de refrigeración

El **hidrógeno** en estado gaseoso presenta un comportamiento diferente a otros gases comunes, como por ejemplo el gas natural. El coeficiente **Joule-Thomson** del hidrógeno es negativo a temperatura ambiente, por lo que el hidrógeno se calienta durante el proceso de expansión.

Durante el repostaje, el hidrógeno experimenta un aumento de temperatura debido a efectos combinados de expansión Joule-Thomson y compresión del gas en el interior del tanque del vehículo. Este calentamiento incrementa cuanto mayor sea la diferencia de presiones entre el sistema de almacenamiento de la estación y el tanque del vehículo, así como el caudal de hidrógeno suministrado.

Este efecto es crítico en el repostaje de hidrógeno, ya que los **tanques de hidrógeno gaseoso** en los vehículos tienen una limitación de temperatura para asegurar su integridad (habitualmente 85 °C), y el proceso de suministro puede exceder dicha temperatura si no se aplican medidas de control térmico. Por este motivo, en repostaje a alta presión (especialmente a 700 bar), es necesario **enfriar previamente el hidrógeno** para compensar el calentamiento durante el llenado.

Este enfriamiento se consigue mediante un **sistema de refrigeración (chiller)**, que incluye un sistema de producción de frío industrial (hasta aproximadamente -40°C) y un intercambiador de calor que enfría el hidrógeno antes de su entrada al vehículo. El preenfriamiento del hidrógeno hasta aproximadamente -40°C es una práctica habitual para facilitar un repostaje rápido y seguro, en línea con los requisitos operativos de los protocolos de llenado (como SAE J2601).

Este sistema es especialmente crítico en **estaciones de alta capacidad**, donde se requieren elevados caudales de repostaje y alta repetitividad de operación (repostajes consecutivos). Asimismo, el sistema de refrigeración representa uno de los principales **consumos energéticos auxiliares** de la estación y condiciona tanto el tiempo de llenado como la capacidad de realizar repostajes consecutivos.

Se pueden utilizar sistemas de refrigeración basados en refrigerantes industriales o CO_2 . En determinadas configuraciones industriales puede aprovecharse una fuente criogénica ya disponible en la instalación (por ejemplo, corrientes de nitrógeno líquido), siempre que se garantice el cumplimiento de las condiciones de preenfriamiento requeridas.

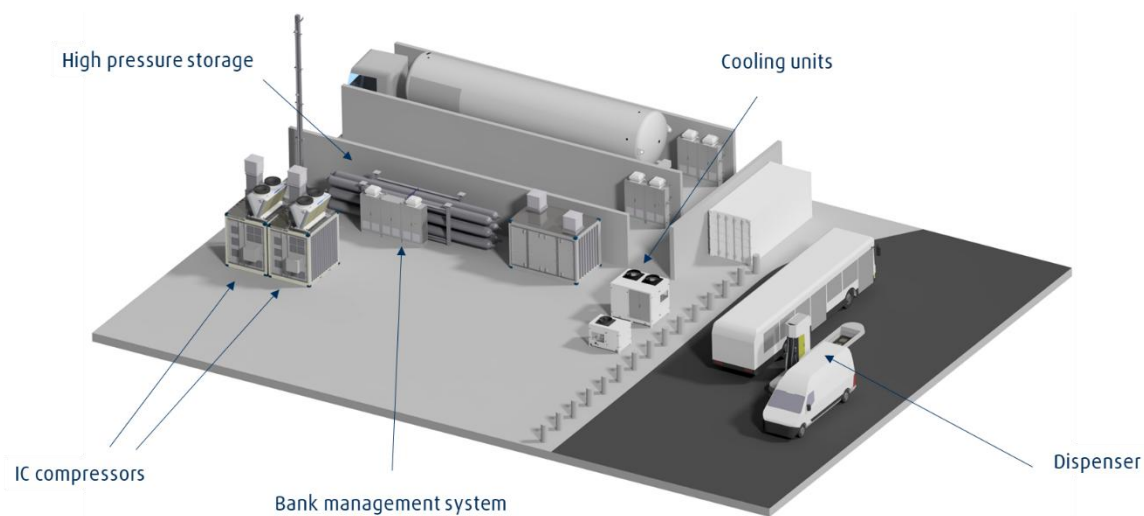


Figura 11.- Ejemplo de sistema de compresión basado en tecnología de líquido iónico IC90 (Fuente: Linde, 2026). El sistema integra un chiller industrial y un intercambiador de calor para el preenfriamiento del hidrógeno antes del repostaje.

4.1.6. Sistemas auxiliares

Otros sistemas que componen una estación de repostaje son el eléctrico y de control, el sistema de aire o nitrógeno de instrumentación y el sistema de protección contra incendios y seguridad.

Estos elementos, aunque no formen parte directa del proceso de repostaje, son esenciales para garantizar la seguridad, fiabilidad y continuidad operativa de la estación.

El **sistema eléctrico y de control** integra:

- La alimentación de todos los equipos principales (compresión, almacenamiento, refrigeración y dispensación).
- Sistemas de automatización, monitorización y control de la estación, permitiendo una operación segura y eficiente. Este sistema incluye la instrumentación necesaria para la medición de variables clave (presión, temperatura, caudal).
- Sistemas de detección de fugas de hidrógeno, ventilación y enclavamientos de seguridad que permiten la parada automática en caso de condiciones anómalas.
- En estaciones avanzadas, estos sistemas se complementan con soluciones de monitorización remota y diagnóstico, que facilitan la operación continua, el mantenimiento predictivo y la maximización de la disponibilidad de la instalación.

El **sistema de aire o nitrógeno de instrumentación** se utiliza para la operación neumática de válvulas y actuadores, así como para la inertización de equipos y líneas, reduciendo el riesgo de formación de mezclas inflamables durante operaciones de arranque, parada o mantenimiento.

Por su parte, los **sistemas de protección contra incendios y seguridad** están diseñados para gestionar escenarios de riesgo asociados al hidrógeno, incluyendo detección temprana, ventilación adecuada y medidas de mitigación conforme a las normativas aplicables.

4.2. Estaciones de cH₂ alimentadas con hidrógeno líquido (LH₂ → cH₂)

En las estaciones de **cH₂ alimentadas con hidrógeno líquido**, el hidrógeno se recibe en forma de LH₂ en tanques criogénicos a baja presión y temperatura criogénica (aproximadamente -253°C a 1 bar de presión). En esta configuración, el **hidrógeno líquido** actúa principalmente como **vector logístico**, permitiendo el suministro de grandes cantidades de hidrógeno a la estación con una elevada densidad energética volumétrica.

El suministro de cH₂ se podría realizar regasificando el hidrógeno y comprimiéndolo después, pero una de las ventajas de esta forma de aprovisionamiento de hidrógeno consiste en comprimirlo a las presiones de suministro en estado líquido.

En efecto, a diferencia de las estaciones alimentadas con hidrógeno gaseoso, en las estaciones de cH₂ alimentadas con hidrógeno líquido, la elevación de presión se realiza mediante una **bomba criogénica** que presuriza el hidrógeno en fase líquida, lo que resulta significativamente más

eficiente desde el punto de vista energético respecto a la compresión del hidrógeno gaseoso. Una vez **presurizado**, el **hidrógeno** se **evapora** y acondiciona para **dispensarlo** como hidrógeno gaseoso comprimido a los **vehículos**.

Esta solución combina las **ventajas logísticas del transporte** y almacenamiento de **hidrógeno líquido** (mayor densidad energética volumétrica, grandes cantidades por envío), así como su compresión, con la **compatibilidad total con vehículos** que almacenan **hidrógeno** en forma **gaseosa** a bordo (350 o 700 bar). La utilización de hidrógeno líquido permite reducir significativamente la complejidad logística asociada al suministro de la estación, al disminuir el número de entregas necesarias y facilitar el abastecimiento de estaciones de alta capacidad. Asimismo, el uso de bombeo criogénico en lugar de compresión gaseosa reduce el consumo energético asociado a la elevación de presión, relevante en estaciones de gran caudal.

Esta arquitectura resulta especialmente interesante para **estaciones de alto caudal** en corredores de transporte pesado, donde el suministro criogénico permite gestionar grandes consumos diarios manteniendo la flexibilidad de repostar flotas de camiones, autobuses o trenes que utilizan almacenamiento gaseoso.

Desde el punto de vista de diseño, estas estaciones integran tanques criogénicos de almacenamiento de LH₂, sistemas de bombeo criogénico, vaporizadores y sistemas de acondicionamiento térmico, además de los subsistemas de almacenamiento en cascada y dispensación típicos de estaciones de cH₂. Como ejemplo de las soluciones tecnológicas empleadas en este tipo de estaciones, la Figura 12 muestra un sistema de bombeo criogénico utilizado para la presurización de hidrógeno líquido.

En este sentido, la arquitectura LH₂ → cH₂ puede considerarse una **evolución de las estaciones convencionales**, orientada a mejorar la escalabilidad y eficiencia de la infraestructura de repostaje.

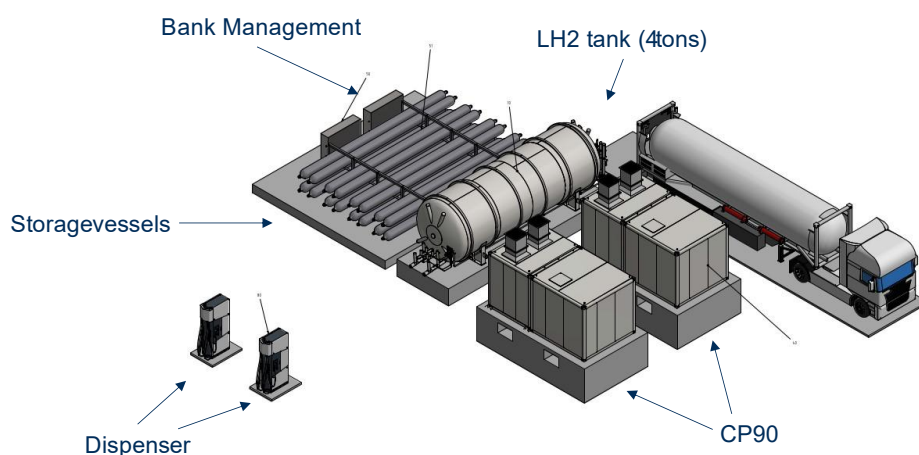


Figura 12.- Ejemplo de sistema de bombeo criogénico para estaciones de repostaje LH₂ usando \rightarrow cH₂. Configuración ilustrativa con 2 bombas criogénicas, dispensadores H70, tanque vertical de LH₂ y almacenamiento en alta presión. Fuente: Linde, 2026.

4.3. Estaciones de repostaje líquido “on-board” (sLH₂ → sLH₂)

Las estaciones de repostaje líquido “on-board” están orientadas a vehículos que incorporan **almacenamiento de hidrógeno líquido a bordo**, como determinados camiones de largo recorrido y aplicaciones ferroviarias. En este tipo de estaciones, el hidrógeno se almacena en forma de hidrógeno líquido en tanques criogénicos, y se suministra al vehículo manteniéndose en fase líquida durante todo el proceso de repostaje.

Aunque conceptualmente el repostaje líquido podría realizarse con hidrógeno en condiciones cercanas a saturación, en la práctica industrial se emplea **hidrógeno líquido subenfriado** (sLH₂), lo que permite **mejorar la estabilidad del proceso**, reducir las pérdidas por evaporación (*boil-off*) y habilitar un control más preciso del llenado. El repostaje sLH₂ se realiza típicamente a temperaturas del orden de -247 a -253 ° C y presiones moderadas (\approx 10-20 bar), condiciones seleccionadas para mantener el hidrógeno en fase líquida sin presencia de fase gaseosa y garantizar la estabilidad del proceso de llenado.

En estas estaciones el hidrógeno se **almacena** igualmente como **LH₂** en tanques criogénicos, pero la bomba criogénica eleva la presión y suministra directamente hidrógeno líquido subenfriado al depósito criogénico del vehículo. El repostaje sLH₂ elimina la etapa intermedia en fase gaseosa, lo que diferencia esta arquitectura de las estaciones LH₂ → cH₂, reduciendo pérdidas energéticas asociadas a la vaporización y **simplificando la cadena de acondicionamiento** del hidrógeno.

Este enfoque permite **caudales de repostaje muy elevados** (centenares de kilogramos por hora) con tiempos de llenado de 10-15 minutos, comparables a los combustibles convencionales, facilitando autonomías largas y altos factores de utilización para el transporte pesado. A cambio, exige un **diseño avanzado** del **sistema criogénico** para minimizar pérdidas por evaporación, y para optimizar la eficiencia energética del sistema.

La elevada densidad energética volumétrica del hidrógeno líquido permite maximizar la autonomía del vehículo, reduciendo la frecuencia de repostaje y mejorando la eficiencia operativa de las flotas.

Desde el punto de vista de la estación, la ausencia de etapas de compresión gaseosa y refrigeración profunda reduce el consumo energético específico del proceso (del orden de 0,05 kWh/kg de hidrógeno dispensado), lo que constituye una **ventaja potencial** frente a arquitecturas basadas en CH_2 .

No obstante, esta configuración requiere una gestión avanzada de sistemas criogénicos, incluyendo el control de temperaturas extremadamente bajas, la minimización de pérdidas por evaporación, y el diseño de interfaces seguras entre estación y vehículo. Asimismo, el repostaje sLH_2 introduce nuevos requisitos en términos de estandarización de interfaces, protocolos de llenado y validación operativa, actualmente en desarrollo en el ámbito internacional.

Desde el punto de vista del despliegue, esta tecnología se encuentra en una **fase emergente**, con proyectos piloto y primeras implementaciones comerciales, pero con un potencial significativo para convertirse en una solución clave en aplicaciones de movilidad pesada de alta demanda.

El desarrollo del repostaje sLH_2 refleja una tendencia hacia soluciones de mayor densidad energética y rendimiento operativo, orientadas a aplicaciones donde la eficiencia logística y la autonomía son factores críticos.

En el caso del repostaje de **hidrógeno líquido**, las **normas** específicas se encuentran **en desarrollo**, destacando ISO 13984 [37], que define los componentes y procedimientos de suministro criogénico.

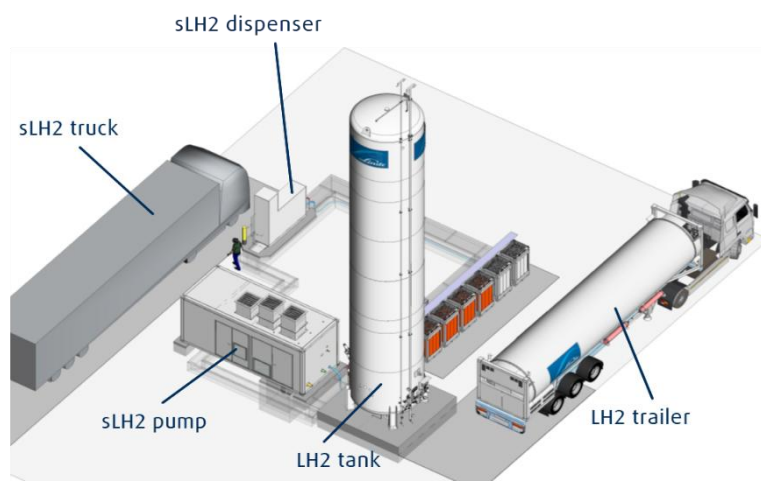


Figura 13.- Esquema ilustrativo de una estación de repostaje de hidrógeno líquido subenfriado (sLH₂), incluyendo tanque criogénico, sistema de bombeo, dispensador y logística de suministro.

4.4. Comparación tecnológica arquitectura de repostaje de hidrógeno

La Tabla 7 resume la arquitectura de las diferentes opciones de estaciones de repostaje de hidrógeno.

Tabla 7.- Resumen de las arquitecturas de estaciones de repostaje de hidrógeno

Arquitectura	Estado en vehículo	Caudal típico	Madurez	Temperatura en dispensación	Presión en dispensación	Estado del H ₂ en suministro	Objetivo principal
cH₂	Gas	Medio	Alta	~ -40 ° C	350 / 700 bar	Gas comprimido	Simplicidad y compatibilidad con vehículos actuales
LH₂ → cH₂	Gas	Alto	Media	~ -40 ° C	350 / 700 bar	Líquido	Mejorar logística y eficiencia frente a cH ₂
sLH₂	Líquido	Muy alto	Emergente	~ -247 a -253 ° C	~ 10-20 bar	Líquido subenfriado	Maximizar densidad energética y eficiencia operativa

4.5. Infraestructuras comunes de repostaje de hidrógeno

Más allá de estas variantes, las estaciones de servicio de hidrógeno para movilidad por carretera suelen incluir los siguientes **subsistemas** principales:

- **Módulo de recepción de hidrógeno.** Recepción de remolques de hidrógeno comprimido o líquido, conexión a gasoducto o integración con electrolizador local.
- **Unidad de compresión o bombeo.** Compresores de alta presión para CH_2 o bombas criogénicas en el caso de LH2.
- **Almacenamiento intermedio.** Bancos de almacenamiento gaseoso a alta presión para gestionar los picos de demanda y tanques criogénicos para LH2.
- **Sistemas de acondicionamiento.** Gestión de temperatura, sistemas de refrigeración y control de flujo para garantizar un repostaje rápido y seguro.
- **Dispensadores.** Puntos de repostaje equipados con mangueras y boquereles normalizados, sistemas de medida certificados y pantallas de interfaz con el usuario.
- **Sistemas de seguridad y control.** Detección de fugas, ventilación, enclavamientos de seguridad, monitorización remota y automatización de la operación.

Estas soluciones se aplican a un amplio rango de usos, desde la manutenzione y la logística interna hasta vehículos ligeros, autobuses y camiones, seleccionando la combinación gas/líquido más adecuada según el caso de uso y los requisitos de autonomía, espacio y coste.

En el caso de **aplicaciones de transporte pesado**, el diseño de la estación debe considerar caudales de repostaje elevados, operación *back-to-back* (varios camiones consecutivos) y una alta disponibilidad del sistema, lo que exige una gestión avanzada de almacenamiento, compresión y mantenimiento.



Figura 14.- Estación de repostaje de hidrógeno en la Zona Franca de Barcelona. Fuente: J.R. Morante

4.5.1. Tipologías de estaciones de repostaje de hidrógeno según la forma de aprovisionamiento

Según las características del aprovisionamiento de hidrógeno a una estación de repostaje, se presenta la siguiente categorización:

- **Estaciones de repostaje suministradas por semitrailer.** Reciben el hidrógeno comprimido gaseoso a distintas presiones de trabajo. Históricamente, las presiones de transporte de hidrógeno habituales eran del orden de 200 bar; no obstante, actualmente se están empezando a utilizar presiones más elevadas, de 350 y 380 bar.
- **Estaciones de repostaje suministradas por tubería.** Reciben el hidrógeno desde una red, ya sea porque la ubicación cuenta con producción de hidrógeno onsite, o desplazada.
- **Estaciones de repostaje suministradas por hidrógeno líquido.** Suministran hidrógeno a vehículos tanto en fase líquida como comprimido gaseoso.

4.5.2. Tipologías de estaciones de repostaje en función de la existencia o no de producción onsite

En función de si la estación de repostaje cuenta con producción propia de hidrógeno onsite o no, se presenta la siguiente diferenciación:

- **Estación de servicio con producción de hidrógeno onsite.** Coloquialmente conocida en España como hidrogeneras.
- **Estaciones de servicio sin producción de hidrógeno onsite.** Coloquialmente conocida en España como hidrolineras.

4.6. Estado de desarrollo y modelos de negocio emergentes

En la actualidad existen estaciones tanto públicas como privadas, con un despliegue progresivo en Europa. A nivel nacional, la falta de estaciones de repostaje se presenta como **uno de los cuellos de botella del mercado**. Aunque el desarrollo de estaciones de repostaje es más lento de lo esperado, se presenta una enorme oportunidad de crecimiento si el despliegue se realiza de forma coordinada con la oferta de vehículos y la producción de hidrógeno renovable.

A nivel internacional, la red de estaciones de repostaje de hidrógeno muestra una **distribución geográfica desigual**, con mayor concentración en determinados países europeos, Norteamérica y Asia, y una clara priorización de los corredores para transporte pesado.

Las tendencias actuales muestran como los **nuevos modelos de negocio** van a enfocarse en **estaciones de mayor capacidad**, con énfasis en la **digitalización**, la monitorización remota y los servicios avanzados de operación y mantenimiento para asegurar altos niveles de disponibilidad. Asimismo, se observa una creciente **integración vertical de cadenas** producción-distribución-repostaje-uso (**“hidrógeno como servicio”**), con contratos de suministro a largo plazo y sinergias con la generación renovable local, especialmente en proyectos de flotas cautivas y transporte pesado.

5. 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 claramente **asimétrica por segmentos**. Mientras que el vehículo ligero avanza de forma contenida, el **transporte pesado, las flotas cautivas y las aplicaciones fuera de carretera (off-road)** concentran el mayor dinamismo y expectativas de crecimiento.

El hidrógeno se encuentra en una fase de **transformación** impulsada por la convergencia de tres dinámicas principales: presión regulatoria, apoyo institucional e innovación tecnológica. A escala global, estas dinámicas se materializan de forma diferente según la región:

- **Asia** (especialmente China, Japón y Corea del Sur) ha priorizado programas específicos de demostración y despliegue de vehículos y estaciones.

- La **Unión Europea** ha articulado objetivos vinculantes de reducción de emisiones y marcos de apoyo a la infraestructura.
- **Norteamérica** combina iniciativas estatales y federales centradas en el transporte pesado y los corredores logísticos.

La **Unión Europea** ha establecido **objetivos vinculantes** de **reducción** de **emisiones** que exigen una transformación profunda del parque automovilístico en las próximas décadas, incluyendo reducciones de emisiones del 90% en vehículos pesados para 2040 por ejemplo. Este marco regulatorio proporciona señales claras al mercado y orienta las decisiones de inversión. Paralelamente, el **despliegue de infraestructura** se está consolidando como condición habilitadora **crítica**. El Reglamento europeo de Infraestructura para Combustibles Alternativos [38] establece **metas concretas** para el desarrollo de estaciones de repostaje de hidrógeno a lo largo de la red transeuropea de transporte, creando previsibilidad y reduciendo el riesgo regulatorio.

En paralelo, países como **China** han fijado **hojas de ruta cuantitativas** para **flotas de vehículos** de hidrógeno y **número de estaciones** de repostaje de hidrógeno, con planes nacionales que apuntan a varios centenares de miles de vehículos de pila de combustible y del orden de 1.400 estaciones de repostaje a horizonte 2035, lo que refuerza su papel como mercado tractor en esta fase temprana.

Instrumentos financieros como el Innovation Fund, el European Hydrogen Bank o el futuro Sustainable Transport Investment Plan complementan este marco mediante apoyo a la inversión y, previsiblemente, a los costes operativos en fases iniciales. En otros mercados, este papel lo desempeñan fondos nacionales de demostración, programas regionales de flotas y mecanismos de colaboración público-privada orientados a corredores específicos de transporte pesado.

El desarrollo del mercado de vehículos impulsados por hidrógeno dependerá de la evolución coordinada de varios factores clave:

- el despliegue suficiente de **infraestructuras de repostaje** en los corredores prioritarios
- la **sincronización entre la disponibilidad de vehículos y de estaciones**
- el **acceso a hidrógeno renovable a precios competitivos**
- un **marco regulatorio estable y predecible**
- una **aceptación progresiva** por parte de operadores y usuarios finales.

A ello se suma la necesidad de avanzar en **economías de escala y estandarización**, ya que serán determinantes para reducir costes, limitar riesgos de adopción y mejorar la competitividad de estas soluciones frente a otras alternativas tecnológicas.

5.1. Contexto Global

En **España**, desde 2020, la proliferación de **proyectos demostrativos** vinculados al uso de hidrógeno en la movilidad terrestre ha generado flotas de vehículos de pila de combustible asociados a dichos proyectos. A finales del 2025 se contabilizaban **74 autobuses** de pila de combustible, de empresas de transporte urbano de Barcelona (más de 30), de Madrid (más de 10) y de otras ciudades. Asimismo, existían **45 vehículos ligeros** de pila de combustible en operación (Toyota Mirai y Hyundai Nexa), **2 furgonetas** eléctricas range extender con pila de combustible (Renault Master) y **7 carretillas** de handling propulsadas por pila de combustible.

En cuanto a las **estaciones de repostaje** de hidrógeno en España, existen **11 puntos** de repostaje de hidrógeno privadas y de capacidad reducida (presión de suministro 350 bar), además de 3 puntos de repostaje de hidrógeno para carretillas y material handling. Se estiman unas 6 nuevas estaciones de repostaje en construcción de próxima apertura, como se indica en la Figura 15.

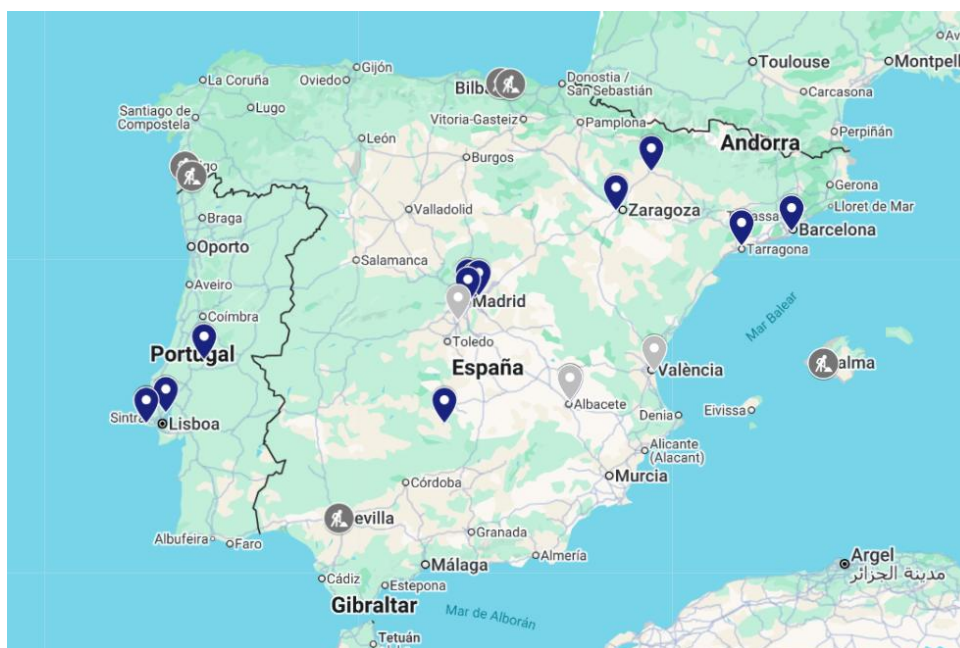


Figura 15.- Estaciones de repostaje en España [39].

En el marco **europeo**, el Observatorio Europeo del Hidrógeno, recoge que a finales de 2024 existían **6.509 vehículos** de pila de combustible, principalmente vehículos ligeros, según se indica en la Figura 16.

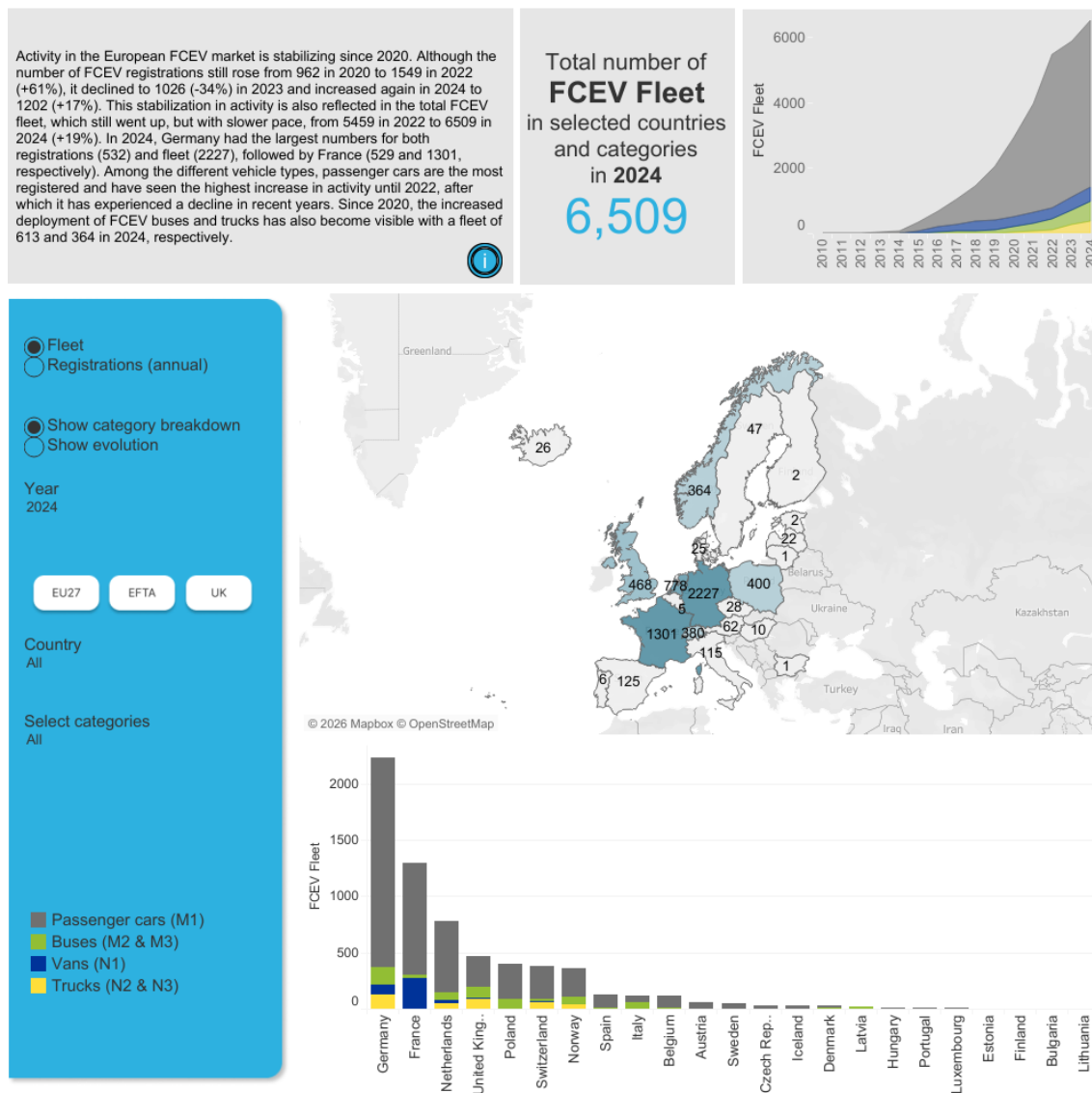


Figura 16.- Flota de vehículos de pila de combustible (FCEV) en Europa [29].

A nivel **mundial** la Agencia Internacional de la Energía (IEA) identifica cerca de **100.000 vehículos** de pila de combustible, con un crecimiento rápido a partir del 2020. Corea del Sur lidera la flota de vehículos ligeros de pila de combustible (más de 30.000 FCEV), mientras que China apuesta por los autobuses y camiones de pila de combustible [40].

Corea del Sur se mantiene a la cabeza, con el 36% del parque vehicular total de pilas de combustible y el 51% del parque de turismo. En el segmento de vehículos comerciales, China es, con diferencia, el país líder, con el 82% del parque mundial de autobuses de pila de combustible y entre el 88% y el 98% de los parques de vehículos ligeros, medianos y pesados. Cabe destacar

que el 92% de los vehículos de pila de combustible se operan en tan solo cuatro países: Corea del Sur, China, Estados Unidos y Japón. Por segmento, los turismos de pila de combustible dominan claramente, con el 69% del total de vehículos de pila de combustible. El despliegue más reciente de esta tecnología ha priorizado de forma clara los camiones pesados, con un aumento del 72% en comparación con 2023.

La **red de puntos de repostaje** mundial de hidrógeno supera las **1.302 estaciones**, según la IEA. China vuelve a liderar la lista, con 522 estaciones de repostaje. Con un número significativamente menor de estaciones, Corea del Sur y Japón ocupan el segundo y tercer lugar.

El **crecimiento** de los vehículos de pila de combustible y del número de estaciones de repostaje de hidrógeno se ha **ralentizado** en los últimos años. La principal razón es el éxito de mercado de los **vehículos eléctricos de batería** en la mayoría de los segmentos de vehículos de carretera [41].

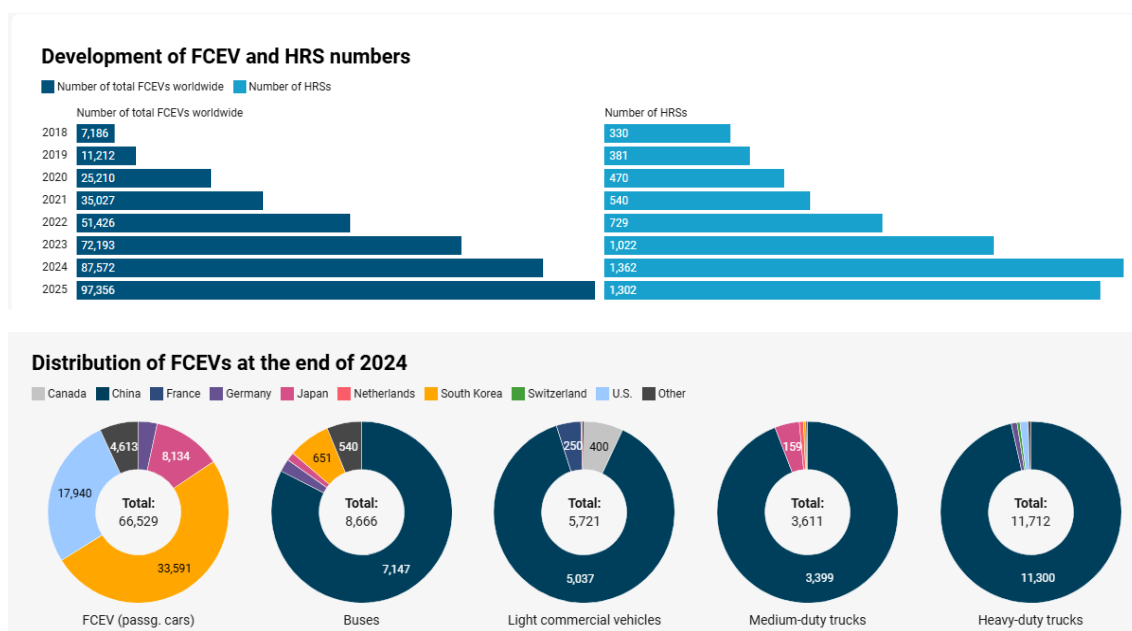


Figura 17.- Desarrollo de los vehículos de pila de combustible y estaciones de repostaje. [40]

En el caso concreto de China, esta posición de liderazgo en vehículos comerciales y estaciones de repostaje convive con un peso todavía muy reducido de los vehículos de pila de combustible en el conjunto de su producción anual de automóviles, en un contexto en el que los vehículos eléctricos de batería absorben la mayor parte del crecimiento del mercado. No obstante, las hojas de ruta nacionales chinas contemplan un incremento significativo de las flotas de vehículos de hidrógeno y de la red de repostaje de hidrógeno a horizonte 2030–2035, lo que refuerza su papel como uno de los principales mercados tractores en la fase de despliegue temprano de la movilidad con hidrógeno.

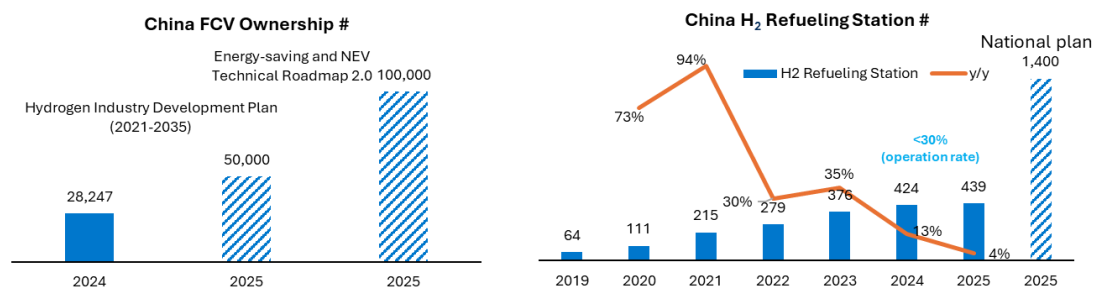


Figura 18.- Evolución prevista del parque de vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCV) en China según los planes nacionales de desarrollo de la industria del hidrógeno. (Figura de elaboración propia adaptada de CAAM - China Association of Automobile Man)

5.2. Vehículos ligeros (turismos y comerciales ligeros)

El mercado global de **vehículos ligeros propulsados por hidrógeno**, principalmente **vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV)**, presenta actualmente un **volumen de despliegue reducido** y un grado de **madurez comercial limitado**. Su presencia en el mercado se concentra en **un número restringido de fabricantes** (principalmente Toyota y Hyundai en el caso de vehículos ligeros) concentrados en determinadas regiones geográficas (más del 90% de estos vehículos se encuentran en Corea del Sur, Estados Unidos, Japón y China) donde existe un mayor despliegue de infraestructura de repostaje de hidrógeno.

Este segmento se caracteriza por:

- **Tener una oferta de producto altamente concentrada**, con un número reducido de modelos disponibles en el mercado.
- **Producción en series cortas o medias**, lo que refleja el carácter aún emergente de esta tecnología.
- **Comercialización focalizada en mercados específicos**, principalmente en países o regiones donde se dispone de **infraestructura de estaciones de repostaje** y políticas activas de apoyo a la movilidad basada en hidrógeno.
- **Elevada dependencia de incentivos públicos**, tanto para la adquisición de vehículos como para el desarrollo de la infraestructura asociada.

En el contexto actual de transición hacia la movilidad de bajas emisiones, el **vehículo ligero de hidrógeno** compite de forma directa con otras tecnologías de electrificación del transporte, especialmente con **Vehículos eléctricos de batería (BEV)** y **Vehículos híbridos enchufables**

(PHEV). Estas alternativas presentan actualmente **mayores niveles de penetración en el mercado**, impulsados principalmente por una **infraestructura de recarga más extendida** y por **economías de escala más avanzadas en su producción**.

El despliegue del hidrógeno en el segmento de vehículos ligeros se enfrenta actualmente a una serie de **barreras estructurales** que condicionan su competitividad frente a otras tecnologías de propulsión, especialmente los vehículos eléctricos de batería (BEV):

- **Coste total de propiedad** (TCO)³ generalmente superior en la mayoría de los mercados, impulsado tanto por el precio de los vehículos como por el coste del propio hidrógeno como vector energético.
- **Infraestructura de repostaje** insuficiente y geográficamente dispersa, lo que restringe la usabilidad del vehículo y genera incertidumbre en el usuario final.
- **Desventaja** relativa en términos de **eficiencia del ciclo completo** *well-to-wheel*⁴, debido a las pérdidas asociadas a su producción, compresión, transporte y conversión en electricidad a bordo mediante pila de combustible.
- La **elevada madurez tecnológica** y la creciente aceptación social de los **vehículos eléctricos de baterías** (BEV) consolidan su posición como solución dominante en el corto y medio plazo, reforzada por economías de escala, redes de recarga en expansión y un ecosistema industrial ya establecido.

No obstante, el hidrógeno encuentra **nichos de aplicación** donde sus características diferenciales pueden traducirse en ventajas operativas claras:

- **Flotas de taxis** y los **vehículos con alta intensidad** de uso diario, donde la rapidez de repostaje frente a los tiempos de recarga eléctrica permite maximizar la disponibilidad del activo.
- Oportunidades en **regiones** que cuentan con **políticas públicas** explícitas de fomento del hidrógeno, donde los incentivos regulatorios y el desarrollo de infraestructura reducen significativamente las barreras de entrada.

³ El [Coste Total de Propiedad](#) es un análisis financiero que evalúa el coste directo e indirecto total de adquirir, operar y mantener el vehículo a lo largo de toda su vida útil, no solo el precio de compra inicial.

⁴ El ciclo *Well-to-Wheel* (WtW) o de "pozo a la rueda" es el análisis integral del impacto ambiental de un vehículo. Evalúa todas las etapas: desde la extracción, producción y transporte del combustible o energía (Well-to-Tank), hasta su consumo final durante la conducción (Tank-to-Wheel), proporcionando una visión de las emisiones totales.

- Usuarios que priorizan una **elevada autonomía** junto con **tiempos de repostaje** comparables a los de los combustibles convencionales, características difíciles de igualar por los BEV sin comprometer peso, coste o tiempos de recarga.

En estos contextos específicos, los vehículos ligeros de hidrógeno pueden posicionarse como una alternativa complementaria a la electrificación por baterías, aportando valor en escenarios donde la **flexibilidad operativa** y la **continuidad del servicio** son factores críticos.

5.3. Vehículos pesados y transporte de mercancías

El segmento de **vehículos pesados** constituye actualmente uno de los **focos principales** de desarrollo para las tecnologías basadas en hidrógeno dentro del ámbito de la movilidad. A diferencia del vehículo ligero, su evolución está marcada por una dinámica de mercado más orientada a la **industrialización progresiva** y a la adopción en **entornos operativos** reales.

China es el líder a nivel mundial en el empleo de autobuses y camiones propulsados por pila de combustible de hidrógeno. Corea del Sur y Japón también mantienen programas significativos de autobuses y camiones de pila de combustible, mientras que en Europa y Norteamérica se están desplegando progresivamente flotas piloto vinculadas a corredores logísticos y proyectos de descarbonización del transporte pesado.



Figura 19.- Estación de repostaje de hidrógeno para autobuses de pila de combustible en Corea del Sur. Fuente: Linde.

En los últimos años se observa la **entrada gradual** de **fabricantes** tradicionales, que están integrando soluciones de hidrógeno en sus hojas de ruta tecnológicas. Este proceso viene acompañado de la puesta en marcha de proyectos piloto a escala comercial, que permiten validar el rendimiento técnico y económico en condiciones reales de operación. Asimismo, comienzan a consolidarse contratos marco con grandes **operadores logísticos**, lo que refleja una transición

desde la fase experimental hacia modelos de negocio más estructurados. Todo ello se alinea con las estrategias corporativas de descarbonización, en las que el hidrógeno se posiciona como una herramienta clave para reducir emisiones en **segmentos difíciles de electrificar**.

En este contexto, el **transporte pesado por carretera**, incluyendo camiones de largo recorrido, autobuses interurbanos y autocares, se considera el **principal vector de crecimiento** del hidrógeno en movilidad terrestre. Esta prioridad responde a una serie de **razones estructurales**:

- **Limitaciones físicas** de los **vehículos eléctricos de batería** (BEV) en términos de autonomía y carga útil se vuelven más críticas a medida que aumentan las distancias y las exigencias de carga.
- El transporte pesado requiere una alta **disponibilidad operativa**, con tiempos de parada mínimos, lo que favorece soluciones con **repostaje rápido** como el hidrógeno.
- Muchas de estas operaciones se desarrollan en **rutas predecibles** y **corredores logísticos** definidos, lo que facilita la planificación y el **despliegue de infraestructuras** de **repostaje** dedicadas. Esta característica reduce significativamente una de las principales barreras del hidrógeno: la disponibilidad de infraestructura.

Desde el punto de vista tecnológico, las **pilas de combustible** (FC) se perfilan como la solución dominante a medio y largo plazo, gracias a su mayor eficiencia y su capacidad para ofrecer **autonomías elevadas** sin penalizar significativamente la carga útil. Paralelamente, los **motores de combustión interna de hidrógeno** (H₂-ICE) emergen como una **alternativa complementaria**, especialmente en mercados sensibles al coste o con menor madurez tecnológica, donde pueden aprovechar plataformas y cadenas de suministro existentes.

Las configuraciones más habituales incluyen camiones de pila de combustible para transporte de larga distancia, autobuses urbanos e interurbanos adaptados a entornos de cero emisiones, vehículos de recogida de residuos con operación intensiva y rutas fijas, así como soluciones para transporte regional de mercancías. En conjunto, este ecosistema configura un segmento con **alto potencial de escalado industrial**, llamado a desempeñar un papel central en la transición hacia una movilidad pesada descarbonizada.

Factores como la capacidad de la red eléctrica, la disponibilidad de infraestructura de carga en cocheras, la topografía o la longitud y exigencia de las rutas condicionan la viabilidad técnica y económica del despliegue masivo de autobuses eléctricos de baterías. En regiones con redes próximas a la saturación, y en perfiles operativos exigentes, los **autobuses de pila de combustible de hidrógeno** pueden representar una **solución más robusta**, incluso cuando el

coste unitario inicial del vehículo eléctrico a batería resulte inferior. La evolución del mercado confirma esta tendencia hacia la **complementariedad**.

El papel del hidrógeno adquiere una dimensión aún más estratégica en el **transporte pesado**. Los **camiones** constituyen la columna vertebral del sistema logístico europeo y, pese a las mejoras en eficiencia energética, la demanda creciente de transporte por carretera neutraliza parte de los avances alcanzados. Una **electrificación total** basada exclusivamente en baterías implicaría **requerimientos energéticos** y de infraestructura de enorme magnitud. Cada estación de carga para vehículos pesados debería disponer de potencias equivalentes al consumo de una pequeña ciudad, y la electrificación completa de todos los camiones europeos, requeriría volúmenes de energía renovable comparables a la demanda eléctrica anual de **grandes economías europeas**.

En este escenario, el **hidrógeno** ofrece **ventajas** para el transporte de larga distancia y operaciones de alta exigencia: mayor **autonomía**, **tiempo de repostaje** y **menores pérdidas de carga útil** respecto a soluciones basadas exclusivamente en baterías.

El despliegue industrial avanza de forma gradual pero sostenida. Además del camión de hidrógeno producido en serie por Hyundai desde 2019, otros fabricantes desarrollan soluciones en fases avanzadas de prueba y preproducción.

La estrategia sectorial más eficaz no pasa por la sustitución excluyente entre **tecnologías**, sino por su **coexistencia** y **complementariedad** para maximizar el ritmo de sustitución de vehículos.

5.4. Vehículos fuera de carretera (off-road) y aplicaciones especiales

El segmento de **vehículos off-road** y aplicaciones especiales engloba un conjunto heterogéneo de equipos móviles caracterizados por **operar fuera del ámbito de la circulación convencional** y, en muchos casos, al margen de los requisitos de matriculación estándar.

Dentro de esta categoría se incluyen la maquinaria agrícola, los vehículos de construcción, los equipos destinados a la actividad minera, así como la maquinaria empleada en entornos portuarios y aeroportuarios. Asimismo, forman parte de este grupo diversos vehículos industriales diseñados para usos específicos en recintos privados o de acceso restringido.

Desde una perspectiva tecnológica y regulatoria, este segmento presenta ciertas **condiciones favorables** para la introducción de soluciones de propulsión basadas en hidrógeno:

- Menor presión normativa en materia de homologación, lo que permite ciclos de adopción más ágiles en comparación con el transporte por carretera convencional.

- Muchas de estas operaciones se desarrollan en entornos cerrados o altamente controlados, favoreciendo la implementación de infraestructuras de repostaje privadas y dedicadas.
- Elevado consumo energético diario de estos equipos, que incrementa la viabilidad económica de alternativas como el hidrógeno frente a otras tecnologías. En este contexto, tanto los motores de combustión interna adaptados a hidrógeno (H₂-ICE) como las pilas de combustible (FC) se posicionan como soluciones técnicamente viables, cada una con ventajas específicas según el caso de uso.

En términos de **adopción**, se observa un creciente interés impulsado por objetivos ESG (ambientales, sociales y de gobernanza), especialmente en **sectores intensivos en emisiones**. En fases iniciales, existe una preferencia por tecnologías H₂-ICE debido a su menor coste relativo y mayor robustez operativa, mientras que las pilas de combustible están ganando terreno en aplicaciones que requieren bajas emisiones acústicas y ausencia total de emisiones locales. En conjunto, este segmento se perfila como uno de los **principales catalizadores** en las etapas tempranas de desarrollo del mercado del hidrógeno, actuando como banco de pruebas para su escalado posterior en otros ámbitos del transporte y la industria.

5.5. Tendencias del mercado

El **desarrollo de los vehículos de pila de combustible** de hidrógeno se encuentra en una fase de **transición** desde la demostración tecnológica hacia la adopción comercial progresiva, condicionado por avances técnicos, dinámicas de mercado y factores estructurales del ecosistema energético. A escala global, las hojas de ruta de países como China prevén un crecimiento significativo tanto del parque de vehículos de hidrógeno como del número de estaciones de repostaje de hidrógeno a horizonte 2030–2035, lo que refuerza el papel de estas economías asiáticas como principales motores del despliegue temprano.

5.5.1. Tendencias tecnológicas

En el ámbito tecnológico, se espera una **reducción progresiva de los costes** de las pilas de combustible, impulsada por mejoras en los procesos de fabricación, la optimización de materiales (especialmente en catalizadores) y el aumento de volúmenes de producción. Este descenso de costes es clave para mejorar la competitividad frente a tecnologías convencionales.

Paralelamente, se están logrando avances significativos en la **durabilidad y densidad de potencia** de los sistemas, lo que permite **aumentar la vida útil** de los vehículos y mejorar su **rendimiento** operativo, especialmente en aplicaciones intensivas como el transporte pesado.

En cuanto a tecnologías complementarias, destaca la evolución de los **motores de combustión interna alimentados con hidrógeno** (H₂-ICE), que están transitando desde adaptaciones de motores convencionales hacia **diseños específicamente optimizados para hidrógeno**, con mejoras en eficiencia y reducción de emisiones.

Asimismo, el desarrollo de soluciones de **almacenamiento en hidrógeno líquido** (LH₂) se perfila como un elemento clave para aplicaciones de largo recorrido, debido a su mayor densidad energética volumétrica frente al hidrógeno comprimido, lo que permite ampliar la autonomía de los vehículos sin penalizar significativamente la capacidad de carga.

5.5.2. Tendencias de mercado

A continuación, se presentan las tendencias del mercado identificadas según el horizonte temporal:

- **Corto plazo (0–5 años):**

Durante esta fase inicial, el mercado estará caracterizado por la proliferación de **proyectos piloto** y primeras flotas comerciales, frecuentemente impulsados por **consorcios público-privados**. El uso del hidrógeno se concentrará principalmente en el transporte pesado (camiones, autobuses) y aplicaciones off-road (minería, construcción, logística portuaria), donde las limitaciones de las baterías eléctricas son más notorias. En este periodo, el desarrollo del mercado dependerá en gran medida de subvenciones, **incentivos fiscales** y marcos regulatorios favorables, dado que los costes totales de propiedad aún serán superiores a las alternativas tradicionales.

- **Medio plazo (5–15 años):**

Según madure la tecnología y se amplíe la infraestructura, se espera un **escalado industrial** en segmentos como camiones y autobuses, acompañado de una mayor estandarización tecnológica. La consolidación de corredores de hidrógeno (infraestructuras de repostaje en rutas estratégicas) facilitará la operación continua de flotas. En este horizonte, la **reducción de costes** permitirá que el coste total de propiedad de los vehículos de hidrógeno se acerque e incluso sea más favorable que el diésel en algunos casos de uso intensivo, especialmente donde el tiempo de operación y la autonomía son críticos.

- **Largo plazo (>15 años):**

En una fase más madura, el hidrógeno se integrará plenamente en **sistemas de transporte multimodales, coexistiendo** con otras tecnologías como los vehículos eléctricos de batería (BEV) y los combustibles sintéticos. El uso del hidrógeno tenderá a especializarse en aplicaciones de **alta demanda energética**, como transporte de larga distancia, ferroviario no electrificado, camiones o maquinaria pesada, donde sus ventajas estructurales resultan más claras frente a otras alternativas.

5.6. Vehículos de hidrógeno

La evolución del mercado ya se traduce en la existencia de modelos concretos de vehículos de hidrógeno en varios segmentos de movilidad. Con el fin de ilustrar este avance, a continuación, se presentan dos tablas diferenciadas: la primera recoge ejemplos representativos de vehículos basados en pila de combustible, mientras que la segunda incluye aplicaciones con motores de combustión interna alimentados con hidrógeno, especialmente en camiones y maquinaria de obra civil. La selección de fabricantes y modelos presentada responde a un criterio ilustrativo y de representatividad tecnológica, por lo que no pretende abarcar de forma exhaustiva todas las soluciones disponibles en el mercado.

Tabla 8.- Modelos de vehículos con pila de combustible en el mercado.

Marca	Tipo de vehículo	Nombre del modelo	Referencia
Hyundai	Coche	NEXO	Hyundai Nexo
BMW	Coche	iX5 Hydrogen	BMW iX5 Hydrogen
Honda	Coche	CR-V e:FCEV	Honda CR-V e:FCEV
Toyota	Coche	Mirai	Toyota Mirai
SAIC	Furgoneta	Maxus MIFA Hydrogen	SAIC MAXUS MIFA Hydrogen
Mercedes-Benz	Autobús	eCitaro Fuel Cell	eCitaro fuel cell
Solaris	Autobús	Urbino 12 hydrogen	Solaris Urbino 12
Toyota	Autobús	SORA	Toyota SORA
Mercedes-Benz	Camión	GenH2 Truck	GenH2 Truck
Hyundai	Camión	XCIENT Fuel Cell	XCIENT Fuel Cell Truck
Nikola ⁵	Camión	Tre FCEV	Nikola Tre FCEV
Kenworth	Camión	T680 FCEV	Kenworth T680 FCEV

⁵ Retirado del mercado por problemas financieros.

Tabla 9.- Modelos de vehículos con motor de combustión interna en el mercado.

Marca	Tipo de vehículo	Nombre del modelo	Referencia
MAN	Camión	hTGX	<u>MAN hTGX</u>
Ashok Leyland	Camión	H2 Truck	<u>Ashok Leyland H2 Truck</u>
JCB	Retroexcavadora	3CX	<u>JCB 3CX</u>
KEYOU	Camión	18t Truck	<u>KEYOU 18t Truck</u>

6. MARCO REGULATORIO EUROPEO Y ESPAÑOL

El **marco regulatorio** es un elemento habilitador fundamental para el despliegue de la movilidad basada en hidrógeno. La Unión Europea ha desarrollado un conjunto de estrategias, directivas y reglamentos orientados a garantizar una transición ordenada hacia la descarbonización del transporte, mientras que España ha adaptado y complementado este marco comunitario mediante planes nacionales, legislación sectorial e instrumentos de financiación.

6.1. Marco regulatorio europeo

El desarrollo de la movilidad con hidrógeno en la Unión Europea se inscribe en un marco regulatorio complejo que integra:

- Estrategia y objetivos generales de descarbonización a 2030 y 2050
- Desarrollo del mercado europeo del hidrógeno
- Despliegue de infraestructura de repostaje en la red transeuropea de transporte (TEN-T)
- Homogeneización de normas técnicas, seguridad y requisitos de calidad del hidrógeno

6.1.1. Estrategias y objetivos generales de la UE

La Unión Europea ha definido el hidrógeno, especialmente el hidrógeno renovable o de bajas emisiones, como un vector clave para alcanzar los objetivos climáticos de la UE, incluyendo la **neutralidad climática para 2050** y reducciones intermedias de emisiones de gases de efecto invernadero de al menos 55 % respecto a 1990 para 2030 (“Fit for 55”). En ese contexto se ha incorporado el hidrógeno como **combustible alternativo y como parte de la descarbonización del transporte terrestre difícil de electrificar únicamente con baterías eléctricas**.

Paralelamente, la UE ha puesto en marcha estrategias específicas de hidrógeno, como la **Estrategia de Hidrógeno de la UE** y su integración en programas como **REPowerEU**, que buscan reducir la dependencia de combustibles fósiles importados y fomentar sistemas energéticos más resilientes.

6.1.2. Mercado europeo del hidrógeno

Una pieza central del nuevo marco regulatorio europeo es la **Directiva (UE) 2024/1788** [42] y el **Reglamento (UE) 2024/1789** [43], adoptados el 13 de junio de 2024, que establecen **normas comunes para los mercados interiores de gas renovable, gas natural e hidrógeno**. Estas normas están diseñadas para:

- Garantizar un mercado competitivo y transparente para el hidrógeno.

- Facilitar la certificación de origen y trazabilidad del hidrógeno renovable y de bajas emisiones.
- Establecer condiciones de acceso a las redes de transporte y almacenamiento.

Un aspecto clave es la definición jurídica dentro de la UE de qué fuentes de hidrógeno pueden calificarse como **renovables o de bajas emisiones**, así como la metodología para evaluar su huella de emisiones de gases de efecto invernadero.

El objetivo es crear un ecosistema europeo coherente, interoperable y seguro para la comercialización del hidrógeno dentro de la UE.

Por otro lado, la directiva denominada **RED III** [44] supondrá un apoyo a la utilización del hidrógeno en el transporte pues, aunque no específicamente centrada en este sector, introduce por primera vez **objetivos vinculantes específicos para el hidrógeno renovable** en transporte, bajo la categoría de **RFNBO** (combustibles renovables de origen no biológico, Renewable Fuels of Non-Biological Origin) a los Estados miembros de la Unión Europea como parte de los mecanismos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar el consumo de energías renovables. Establece el objetivo, para 2030, de que más del 1% de consumo energético en transporte provenga de RFNBO. En cualquier caso, deja a decisión de los Estados miembros las cuotas específicas por sectores.

Respecto a la tecnología de utilización del hidrógeno, la RED III es neutral y no distingue entre vehículo de pila de combustible o H₂-ICE.

6.1.3. Infraestructura de repostaje de hidrógeno para transporte

La regulación específica sobre infraestructura para combustibles alternativos es esencial para habilitar la movilidad con hidrógeno en carretera. En este ámbito, el **Reglamento (UE) 2023/1804 sobre el despliegue de la infraestructura para combustibles alternativos (AFIR)** reemplaza a la antigua Directiva 2014/94/EU y establece las obligaciones vinculantes para los Estados miembro sobre el despliegue de infraestructuras de repostaje. Algunos puntos destacados para el uso de hidrógeno en el transporte terrestre:

- Los Estados miembros deben garantizar que existan **estaciones públicas de repostaje de hidrógeno a intervalos máximos de 200 km en la red transeuropea de transporte (TEN-T)** y en nodos urbanos principales.
- Las obligaciones incluyen la **interoperabilidad** y transparencia de servicios para los usuarios, así como condiciones de pago sencillas y no discriminatorias.

Este reglamento es clave para la adopción comercial de los vehículos de hidrógeno con pilas de combustible (FC) y de combustión interna adaptados a hidrógeno (H₂-ICE), al asegurar condiciones mínimas de repostaje para la movilidad por carretera.

6.1.4. Homogeneización normativa

Además de las obligaciones de política pública, existe un cuerpo técnico de normas europeas e internacionales (EN e ISO) que es de aplicabilidad para **seguridad, diseño, homologación y operación** de instalaciones y equipos de hidrógeno:

- **EN 17127** [36]: relativa a los puntos de suministro que dispensan hidrógeno gaseoso.
- **EN ISO 19880-1** [45]: seguridad y requisitos de estaciones de repostaje de hidrógeno.
- **EN ISO 14687** [35]: especificaciones de calidad del hidrógeno como combustible.
- **UNECE R100** [46]: aplicable a los vehículos de pilas de combustible en relación con la seguridad de sus componentes de alto voltaje y el sistema de almacenamiento de energía recargable.

Este cuerpo normativo proporciona el **marco técnico para homologar tanto la infraestructura de repostaje como los vehículos** que operen con hidrógeno, reduciendo barreras técnicas y facilitando la **armonización a nivel europeo**.

La interoperabilidad en el repostaje de hidrógeno es fundamental para minimizar los riesgos de la inversión pública y la operación privada. Algunos ejemplos de conceptos importantes para garantizar la **interoperabilidad** son:

- Las geometrías de boquillas y receptáculos para 350 y 700 bar se definen en la familia de normas ISO 17268.
- El hardware de alto caudal para servicio pesado se encuentra en proceso de publicación.
- Los protocolos de repostaje más comúnmente aceptados son los especificados en la norma SAE J2601 para servicio ligero y por las normas SAE J2601-2 y SAE J2601-5 (TIR) para servicio pesado.
- La norma ISO 19885-3 [47], en desarrollo, busca armonizar los llenados rápidos dinámicos basados en la comunicación en tanques de mayor tamaño y clases de caudal más elevadas.
- Para líquidos, la norma ISO 13984 [37] define los componentes y los procedimientos de repostaje.

- Las estaciones deben garantizar la calidad del combustible en la boquilla según los límites de la norma ISO 14687, lo que implica la aplicación de rigurosos estándares de limpieza, control de humedad y contaminantes, y procedimientos de muestreo validados.

6.2. Marco regulatorio en España

España ha incorporado la normativa europea a su legislación y ha desarrollado su propio **marco regulatorio** basado en instrumentos adicionales para fomentar la movilidad basada en hidrógeno.

6.2.1. Integración de la normativa europea

Como Estado miembro de la UE, España está obligada a **trasponer y aplicar los reglamentos y directivas europeas** que afectan al hidrógeno y a la movilidad con hidrógeno, incluyendo:

- El **Reglamento AFIR (UE) 2023/1804** sobre infraestructura de combustibles alternativos.
- Las normas del mercado del hidrógeno establecidas en la **Directiva (UE) 2024/1788 y Reglamento (UE) 2024/1789**.

La transposición y ejecución efectiva de estos actos en España se canaliza a través de ministerios como el **Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO)** y el **Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible (MITMA)**, que coordinan los planes nacionales de despliegue de hidrógeno y estaciones de repostaje conforme a los objetivos europeos.

6.2.2. Legislación y planes nacionales

España ha adoptado diversas iniciativas normativas y de planificación que refuerzan el uso del hidrógeno, entre las cuales destacan:

- El **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC)**, que incluye objetivos cuantitativos de producción y uso de hidrógeno renovable en distintos sectores, incluido el transporte.
- Instrumentos derivados del **Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR)**, que financian proyectos de hidrógeno y movilidad sostenible. Ejemplo de ello es la participación española en el **Proyecto Importante de Interés Común Europeo (IPCEI) Hy2Move**, que recibe apoyo estatal para fomentar innovación en movilidad con hidrógeno en colaboración con otros Estados miembro.

- Convocatorias de ayudas nacionales, gestionadas por organismos como el **IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía)**, destinan recursos a proyectos de **I+D+i** y despliegue de tecnologías de hidrógeno aplicadas a movilidad, incluidos vehículos pesados y estaciones de repostaje.

6.2.3. Regulación de infraestructuras

En el contexto español, la **implantación de estaciones de repostaje de hidrógeno públicas** y su integración con redes energéticas se gestiona conforme al Real Decreto 919/2006, así como a través de la planificación nacional de despliegue de combustibles alternativos.

El rol regulador del MITMA y de las administraciones autonómicas y locales es clave para:

- Autorizar y administrar las estaciones de repostaje de hidrógeno conforme a las normas técnicas y de seguridad.
- Integrar estos planes con las redes de transporte viario y la planificación urbanística.
- Coordinar incentivos e inversiones públicas con fondos europeos, nacionales y fondos de cohesión territorial.

6.2.4. Condiciones fiscales y apoyo financiero

Aunque no existe una normativa específica exclusivamente para hidrógeno en movilidad con efectos fiscales particulares (por ejemplo, exenciones tributarias diferenciadas por tipo de combustible), la política de España y de la UE incorpora **incentivos económicos y ayudas** para acelerar la adopción de tecnologías de bajas emisiones, dentro de mecanismos como:

- Fondos del **Mecanismo Conectar Europa (CEF)** que apoyan la instalación de estaciones de repostaje de hidrógeno y otros puntos de repostaje alternativos.
- Líneas de subvenciones a través del PRTR para innovación, industrialización y despliegue en movilidad con hidrógeno.

La coordinación entre **política energética, de transporte e industrial** busca asegurar que España avance en la implementación del hidrógeno como vector para **descarbonizar el transporte por carretera**, tanto en el segmento de vehículos ligeros como en transporte pesado y flotas comerciales.

6.3. Aspectos regulatorios transversales aplicables

Adicionalmente al marco general de hidrógeno e infraestructura, la **homologación de vehículos propulsados por hidrógeno (FC o H₂-ICE)** sigue la **normativa europea** y **UNECE** aplicable a **seguridad, emisiones** y requisitos técnicos. Los estándares de homologación europeos y de la ONU (UNECE) incluyen requisitos de seguridad específicos para sistemas de alta presión y componentes de celdas de combustible y sistemas de propulsión.

En España, las autoridades de transporte aplican dichas normas europeas e internacionales para la **matriculación y certificación de vehículos nuevos** que utilicen hidrógeno como combustible.

6.4. Ámbitos de aplicación y retos regulatorios

El desarrollo normativo actual, a pesar de los avances significativos alcanzados, sigue presentando algunos retos que condicionan la adopción del hidrógeno, entre ellos:

- Aunque existe un marco general para infraestructura y mercado, determinados aspectos técnicos de **certificación de hidrógeno de bajas emisiones** continúan siendo objeto de debate a nivel europeo, como la posible clasificación del hidrógeno producido a partir de energía nuclear como hidrógeno de “bajas emisiones”.
- La **armonización fiscal específica para combustibles alternativos** y la internalización de los costes externos del transporte (como coste social de las emisiones) se encuentran aún en evolución, con propuestas orientadas a incluir al transporte en sistemas de comercio de emisiones extendidos (ETS2).

La resolución progresiva de estos aspectos será clave para el despliegue masivo de la movilidad con hidrógeno.

6. CONCLUSIONES

La movilidad terrestre por carretera con hidrógeno se perfila como una vía tecnológica complementaria y estratégica dentro del proceso de descarbonización del transporte. Su valor no reside en sustituir de forma generalizada a todas las soluciones existentes, sino en aportar una respuesta eficaz en aquellos segmentos donde la electrificación directa mediante baterías presenta mayores limitaciones operativas, energéticas o económicas. En este contexto, el hidrógeno encuentra un encaje especialmente sólido en transporte pesado de larga distancia, autobuses, flotas cautivas, maquinaria y aplicaciones off-road, donde la autonomía, el tiempo de repostaje, la carga útil y la disponibilidad operativa son factores críticos.

- **Complementariedad tecnológica: pilas de combustible y motores H₂-ICE**

Las dos principales rutas tecnológicas analizadas, pilas de combustible y motores de combustión interna alimentados con hidrógeno, no deben interpretarse como opciones excluyentes, sino como soluciones complementarias con ámbitos de aplicación diferenciados. Las pilas de combustible destacan por su mayor eficiencia energética y por operar sin emisiones locales, lo que las convierte en la opción más robusta para transporte pesado por carretera, autobuses y flotas de alta utilización. Por su parte, los motores H₂-ICE ofrecen una vía de implantación más cercana a la base industrial existente, con menor coste inicial y mayor facilidad de adaptación en determinados usos, especialmente en aplicaciones industriales, maquinaria, entornos controlados y fases de transición. La capacidad de estos motores para operar con mezclas pobres añade una ventaja técnica relevante, al permitir reducir la temperatura de combustión y limitar la formación de NO_x en determinados regímenes de funcionamiento, aunque con penalización potencial en potencia específica y con mayores exigencias de control de combustión.

- **Sistemas de almacenamiento de hidrógeno en vehículos**

El almacenamiento a bordo es otro de los principales condicionantes técnicos y económicos del vehículo de hidrógeno. Hoy, el almacenamiento gaseoso a alta presión es la solución dominante y comercialmente viable, mientras que el hidrógeno líquido ofrece un potencial especialmente atractivo para transporte pesado de largo recorrido por su mayor densidad energética volumétrica. Sin embargo, esta segunda vía sigue penalizada por la complejidad de utilizar un líquido criogénico, así como las pérdidas por evaporación, la infraestructura asociada y el coste. Las soluciones basadas en materiales sólidos o almacenamiento crio-comprimido conservan interés tecnológico, pero todavía no compiten en igualdad de condiciones para aplicaciones generalizadas en carretera debido a su temprana fase de desarrollo. En la práctica, la evolución

del almacenamiento condicionará la autonomía, las opciones de integración en el vehículo, el coste total del sistema y, por tanto, la competitividad real del hidrógeno frente a otras alternativas.

- **Tecnologías de repostaje de hidrógeno**

La infraestructura de repostaje constituye uno de los elementos más críticos para la viabilidad real de la movilidad con hidrógeno, al conectar la producción y la logística del combustible con su uso final en el vehículo. Su relevancia no se limita a la existencia física de estaciones, sino que depende de su capacidad para suministrar el hidrógeno en las condiciones de presión, temperatura, caudal y disponibilidad requeridas por cada aplicación. En vehículos ligeros, la operativa se apoya principalmente en repostaje a 700 bar, mientras que en autobuses, camiones y otras aplicaciones pesadas domina el entorno de 350 bar, con una creciente atención a soluciones basadas en hidrógeno líquido y, a más largo plazo, el hidrógeno líquido subenfriado para aumentar autonomía y rapidez de llenado. Esto implica que el diseño de la estación (compresión, almacenamiento intermedio, refrigeración, surtidores y sistemas auxiliares) condiciona directamente el tiempo de repostaje, la capacidad de suministro y la disponibilidad operativa de la flota.

- **Mercado global de vehículos de hidrógeno e infraestructuras**

La evolución del mercado confirma que la adopción del hidrógeno en la movilidad terrestre no seguirá una trayectoria uniforme, sino progresiva, selectiva y claramente segmentada. El vehículo ligero previsiblemente mantendrá un crecimiento contenido y concentrado en nichos específicos, mientras que el transporte pesado, las flotas cautivas y las aplicaciones off-road reunirán el mayor potencial de despliegue a corto y medio plazo. Esta dinámica responde a que el hidrógeno ofrece una propuesta de valor más sólida en aquellos segmentos donde la autonomía, el tiempo de repostaje, la carga útil y la disponibilidad operativa son factores críticos. En consecuencia, la consolidación del mercado vendrá determinada por su capacidad para implantarse en aplicaciones concretas en las que aporte una solución competitiva frente a otras alternativas de descarbonización.

- **Marco regulatorio europeo y español**

El desarrollo de la movilidad con hidrógeno se apoya ya en un marco regulatorio europeo y nacional cada vez más definido. Disposiciones normativas/regulatorias como AFIR, RED III o los planes nacionales de apoyo configuran un entorno más favorable para el despliegue de vehículos e infraestructuras, al introducir objetivos vinculantes, estándares armonizados y mecanismos de

financiación. No obstante, el avance del sector seguirá dependiendo de un factor clave: la falta de sincronización. Si regulación, infraestructura, oferta vehicular y disponibilidad de hidrógeno competitivo no avanzan de forma coordinada, el despliegue será lento, costoso y fragmentado.

- **Conclusión final**

El uso del hidrógeno en movilidad terrestre no debe plantearse como una solución universal, sino como una opción de alto valor en los segmentos más difíciles de electrificar. Sus principales fortalezas (tiempos de repostaje reducidos, elevada autonomía y una relación favorable entre volumen ocupado a bordo y energía útil almacenada) adquieren especial relevancia en vehículos pesados, donde la disponibilidad, la carga útil, el espacio embarcado y la continuidad operativa son factores críticos. Su éxito dependerá de que se despliegue con una lógica de especialización, priorizando aquellos usos en los que sus ventajas operativas y energéticas superan claramente sus sobrecostes y complejidades. En ese escenario, las pilas de combustible y los motores H₂-ICE podrán convivir de manera complementaria, acelerando la transición del transporte por carretera hacia modelos más sostenibles, resilientes y compatibles con los objetivos climáticos europeos.

7. REFERENCIAS

- [1] UC Davis, A Comparative Review of Hydrogen Engines and Fuel Cells for Trucks, 2024.
- [2] BorgWarner Knowledge Library 2021.
- [3] IEA, «ETP Clean Energy Technology,» 2026. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide?layout=list&selectedTechID=all>.
- [4] «Proyecto H2Haul,» [En línea]. Available: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-dashboard/projects-repository/h2haul_en.
- [5] «Proyecto H2Accelerate TRUCKS,» [En línea]. Available: <https://h2accelerate.eu/trucks/>.
- [6] Proyecto Hydrospider, [En línea]. Available: <https://www.hydrospider.ch/en>.
- [7] «Proyecto StasHH,» [En línea]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/101005934>.
- [8] «Proyecto IMMORTAL,» [En línea]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/101006641>.
- [9] Dialogue Earth, [En línea]. Available: <https://dialogue.earth/en/digest/china-boosts-hydrogen-especially-for-industrial-use/>.
- [10] Hyundai, 2026. [En línea]. Available: <https://www.hyundai.com/worldwide/en/newsroom/detail/hyundai-motor%25E2%2580%2599s-xcient-fuel-cell-truck-fleet-achieves-20-million-kilometer-milestone-in-europe-0000001121>.
- [11] Toyota, 2026. [En línea]. Available: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/44232994.html>.
- [12] «Volvo Trucks,» [En línea]. Available: <https://www.volvogroup.com/en/news-and-media/news/2026/apr/powerful-and-fuel-efficient---meet-volvo-s-future-hydrogen-truck.html>.
- [13] MAN, 2024. [En línea]. Available: <https://press.mantruckandbus.com/corporate/man-expands-its-zero-emission-portfolio/>.

- [14] «Cummins,» [En línea]. Available: <https://www.cummins.com/en-na/news/releases/2025/03/06/cummins-and-partners-celebrate-successful-hydrogen-engine-project>.
- [15] «JCB,» [En línea]. Available: <https://www.jcb.com/en-GB/explore/insight/news/2025/05/jcb-secures-full-eu-type-approval-for-pioneering-hydrogen-engine/>.
- [16] DEUTZ, «Annual Report 2025,» [En línea]. Available: https://www.deutz.com/fileadmin/contents/global/investoren/financial_reports/2025/EN/20260326_DEUTZ_FY2025_Annual_Report_en_sec.pdf.
- [17] JRC, JEC Well-To-Wheels report v5, 2020.
- [18] Lean Hydrogen, Hydrogen Storage High Pressure Gaseous Storage Technologies, 2025.
- [19] ISO 9809-1:2019, Gas cylinders — Design, construction and testing of refillable seamless steel gas cylinders and tubes.
- [20] ISO 11119-1:2020, Gas cylinders — Design, construction and testing of refillable composite gas cylinders and tubes. Part 1: Hoop wrapped fibre reinforced composite gas cylinders and tubes up to 450 l.
- [21] ISO 11119-2:2020, Gas cylinders — Design, construction and testing of refillable composite gas cylinders and tubes. Part 2: Fully wrapped fibre reinforced composite gas cylinders and tubes up to 450 l with load-sharing metal liners..
- [22] ISO 11119-3:2020, Gas cylinders — Design, construction and testing of refillable composite gas cylinders and tubes. Part 3: Fully wrapped fibre reinforced composite gas cylinders and tubes up to 450 l with non-load-sharing metallic or non-metallic liners or without liners.
- [23] U.S Department of Energy, Liquid Hydrogen Technologies.
- [24] I. Accary, Hydrogen Solutions - Business Development.
- [25] Toyota, «The Toyota Mirai,» 2023.
- [26] Sustainable Bus, Solaris fuel cell bus: the Urbino 12 hydrogen takes the road, 2021.
- [27] UNECE, Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of Hydrogen-Fuelled Vehicles (HFCV).

- [28] ISO19881:2025. Gaseous Hydrogen - Land vehicle fuel containers.
- [29] Reglamento (UE) 2019/2144 del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de noviembre de 2019 relativo a los requisitos de homologación de tipo de los vehículos de motor y de sus remolques, así como de los sistemas, componentes y unidades técnicas independien.
- [30] *G. Parks, R. Boyd, J. Cornish, and R. Remick, Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing Technical Status and Costs, NREL/BK-6A10-58564, May 2014.*
- [31] *SAE J2601_202005- Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles.*
- [32] *UNE-EN ISO 17268-1:2025 (Ratificada). Dispositivos de conexión para el suministro de hidrógeno gaseoso a los vehículos terrestres. Parte 1: Capacidades de flujo hasta 120 g/s inclusive (ISO 17268-1:2025) (Ratificada por la Asociación Española de Normaliza.*
- [33] *Clean Energy Partnership e.V, Objective of hydrogen refuelling protocols, August 2025, Germany..*
- [34] *Clean Energy Partnership e.V, Design of high-capacity hydrogen refuelling stations for heavy goods vehicles, March 2026, Germany.*
- [35] *ISO 14687:2025. Hydrogen fuel quality — Product specification..*
- [36] *EN 17124:2022. Hidrógeno combustible. Especificación de producto y garantía de calidad para los puntos de suministro de hidrógeno que dispensan hidrógeno gaseoso. Aplicaciones que utilizan las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (P.*
- [37] *ISO 13984:2026. Liquid hydrogen — Land vehicle fuelling protocol..*
- [38] *Reglamento (UE) 2023/1804 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de septiembre de 2023 relativo a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos y por el que se deroga la Directiva 2014/94/UE..*
- [39] Gasnam. [En línea]. Available: <https://gasnam.es/mapa-estaciones-gnc-gnl-biometano-hidrogeno/>.
- [40] IEA Fuel Cells, Fuel Cell Electric Vehicles. Tracking Progress: Growth of Fuel Cell Electric Vehicles (FVECVs) and Hydrogen Infrastructure.
- [41] Thomas Grube & Marietta Sander, Deployment of Fuel Cell Vehicles in Road Transport and the Expansion of the Hydrogen Refueling Station Network.

- [42] *Directiva (UE) 2024/1788 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de junio de 2024, relativa a normas comunes para los mercados interiores del gas renovable, del gas natural y del hidrógeno, por la que se modifica la Directiva (UE) 2023/1791 y se derog.*
- [43] *Reglamento (UE) 2024/1789 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de junio de 2024, relativo a los mercados interiores del gas renovable, del gas natural y del hidrógeno y por el que se modifican los Reglamentos (UE) n.º 1227/2011, (UE) 2017/1938, (UE).*
- [44] *Directiva (UE) 2023/2413 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de octubre de 2023, por la que se modifican la Directiva (UE) 2018/2001, el Reglamento (UE) 2018/1999 y la Directiva 98/70/CE en lo que respecta a la promoción de la energía procedente d.*
- [45] *UNE-ISO 19880-1:2022. Hidrógeno gaseoso. Estaciones de servicio. Parte 1: Requisitos generales..*
- [46] *Reglamento n° 100 de las Naciones Unidas - Disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos en relación con los requisitos específicos del grupo motopropulsor eléctrico [2021/2190].*
- [47] *ISO/CD 19885-3. Gaseous hydrogen – Fuelling protocols for hydrogen fuelled vehicles..*
- [48] The Engineering ToolBox, [En línea]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-d_1419.html.
- [49] U.S. Department of Energy, Hydrogen Storage.
- [50] *Directiva 2014/34/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de febrero de 2014, sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.*
- [51] EG&G Technical Services, Inc, Curva de polarización.
- [52] European Hydrogen Observatory, Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles, 2024.

8. ANEXOS

8.1. Anexo: Aplicaciones ferroviarias.

En general, la huella de carbono del ferrocarril no presenta un impacto reseñable en comparación con el del resto de sectores de movilidad, en especial en Europa, donde los niveles de electrificación, la solución que permite hacer sostenible la mayor eficiencia del ferrocarril, alcanza valores del 60%.

Por este motivo, el ferrocarril se considera principalmente una herramienta de descarbonización orientada a acelerar el cambio modal: sustituir el uso de la carretera por el ferrocarril, aprovechando las sinergias existentes a nivel de intermodalidad logística. Estas sinergias podrían extenderse también al ámbito energético, conforme avance la penetración del H₂ como combustible alternativo en ambos modos de transporte.

No obstante, debido a su vertebración principalmente urbana (última milla) y regional, así como a los problemas de interoperabilidad que dificultan la continuidad en los principales corredores ferroviarios de mercancías, el sector ferroviario plantea retos específicos. En particular, existen tramos con sistemas de electrificación a distinta tensión o tramos cuya electrificación no resulta rentable a medio plazo. En este contexto, el sector ferroviario requiere soluciones específicas basadas en combustibles alternativos que permitan eliminar por completo la tracción diésel.

Existen algunas experiencias piloto relevantes. Entre ellas destaca la desarrollada por el operador ferroviario español de vía estrecha FEVE, en Asturias, en 2011. Esta iniciativa, junto con la adaptación de un antiguo tranvía equipado con pila de combustible y almacenamiento de H₂ comprimido a bordo, convirtió a España en el primer país europeo con un vehículo ferroviario de hidrógeno puesto en vía. Sin embargo, más de una década después, la industria ferroviaria todavía no cuenta con plataformas de servicio de viajeros basadas en "power packs" de H₂ comercialmente disponibles, mediante la combinación de pilas de combustible y almacenamiento comprimido.

La utilización del H₂ en el ferrocarril presenta distintos niveles de madurez tecnológica en función del segmento de tracción considerado: automotores de viajeros, maniobras y locomotoras de línea. En el caso de los automotores de viajeros, pertenecientes al sector ligero, ya existen soluciones comerciales compatibles con las principales plataformas vehiculares homologadas. Sin embargo, las soluciones basadas al 100% en baterías presentan actualmente una mayor competitividad y madurez. Estas no permiten todavía alcanzar una penetración significativa en todo el sector, al menos en el horizonte 2035, cuando se espera que tanto los efectos derivados del desarrollo del "backbone" de infraestructuras troncales de transporte y almacenamiento de H₂

en Europa, como el despliegue de soluciones de repostaje a escala de usuario conforme a AFIR, así como la resolución de determinados técnicos con mayor impacto en el sector, permitan consolidar soluciones basadas en H₂. Entre estos retos destacan el comportamiento de la pila de combustible a largo plazo y su desempeño bajo determinadas condiciones operativas y ambientales específicas del sector.

En el caso del ferrocarril pesado y/o con grandes necesidades de potencia y autonomía, no existen actualmente iniciativas comerciales ni proyectos de desarrollo significativos. Las alternativas frente a la electrificación requieren soluciones duales, (bi y trimodo), capaces de operar de forma flexible y eficiente tanto con catenaria como sin catenaria. En estas circunstancias, la utilización competitiva del H₂ dependerá de la disponibilidad de una arquitectura trinomial formada por la tecnología de propulsión (ICE o FC), almacenamiento a bordo y baterías. Estas últimas serían necesarias para simplificar los requisitos del motor y del sistema de almacenamiento. La densidad energética del conjunto a nivel volumétrico y másico debe ser equivalente, tanto en términos energéticos como dinámicos, a la de los sistemas de tracción que sustituye. Esto supone un reto para el desarrollo de un *"power pack"* integrable en las actuales plataformas vehiculares homologadas para este segmento, especialmente por el nivel de madurez de los sistemas de almacenamiento alternativos a las soluciones comprimidas y por el número todavía reducido de unidades desarrolladas, unas 1.500 a nivel UE y unas 30.000 a nivel mundial, una cifra muy alejada de los millones a los que estamos acostumbrados en el segmento pesado de carretera.

Identificados los antecedentes, el estado actual y los retos del sector, así como los aspectos comunes tanto a nivel de *"power pack"* como de suministro, puede señalarse que el potencial del H₂ en el sector ferroviario ligero podría acelerarse mediante el aprovechamiento del desarrollo de soluciones tecnológicas en el sector de carretera pesada.

El presente anexo recoge una síntesis de distintos proyectos ferroviarios basados en hidrógeno desarrollados en Europa y Estados Unidos. Se presentan iniciativas en fase de demostración y en operación comercial que emplean pila de combustible como alternativa a la tracción diésel en líneas no electrificadas, así como proyectos orientados a la estandarización y definición de requisitos técnicos a nivel europeo.

El objetivo es ofrecer una visión general del estado actual de la tecnología, identificando las principales soluciones adoptadas y su grado de desarrollo en el ámbito ferroviario.

Soluciones comerciales basadas en adaptación de plataformas vehiculares homologadas:

Proyecto Coradia iLint (Alemania)

El Coradia iLint, desarrollado por Alstom, fue el primer tren de pasajeros propulsado por pila de combustible de hidrógeno en entrar en servicio comercial. Su operación comenzó el 16 de septiembre de 2018 en la región de Baja Sajonia (Alemania), conectando las ciudades de Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde y Buxtehude, marcando un hito en la descarbonización del transporte ferroviario regional no electrificado.

El tren dispone de dos tanques de almacenamiento de hidrógeno situados en el techo, con una capacidad de 130 kg cada uno, operando a una presión aproximada de 350 bar. La propulsión se basa en dos pilas de combustible con una potencia de 210 kW cada una, complementadas por una batería de iones de litio que gestiona la recuperación de energía en el frenado y el suministro a sistemas auxiliares. El sistema de tracción eléctrica en corriente alterna permite alcanzar una velocidad máxima de 140 km/h.

En operación real, el Coradia iLint ha demostrado un elevado rendimiento, alcanzando en septiembre de 2022 un récord mundial al recorrer 1.175 km con un solo llenado de hidrógeno. El consumo operativo se sitúa en un rango aproximado de 0,25 a 0,30 kg de H₂ por kilómetro, dependiendo de las condiciones de explotación.

El repostaje se realiza sin necesidad de apagar las pilas de combustible, con tiempos comprendidos entre 20 y 60 minutos. La infraestructura se apoya en una estación específica para trenes de pasajeros ubicada en Bremervörde, con capacidad de suministro de hasta 1.814 kg de hidrógeno al día, dimensionada para atender una flota de 14 trenes con consumos diarios del orden de 1.633 kg, donde cada unidad puede repostar aproximadamente 260 kg de hidrógeno en la estación.



Figura 20.- Tren Coradia iLint

Proyecto Stadler FLIRT H₂ (Estados Unidos)

El Stadler FLIRT H₂ es una unidad eléctrica múltiple de pasajeros propulsada por pila de combustible de hidrógeno, desarrollada por Stadler con el objetivo de descarbonizar servicios regionales en líneas no electrificadas de Estados Unidos. El sistema obtiene electricidad a partir del hidrógeno para alimentar la tracción, los sistemas auxiliares y la carga de baterías de iones de litio, configurándose como una alternativa directa a la tracción diésel convencional con operación de cero emisiones en vía.

El hidrógeno se almacena en tanques integrados en la unidad, generalmente ubicados en la parte superior del tren. La plataforma puede incorporar un pantógrafo, lo que permite una operación híbrida bajo catenaria en tramos electrificados y el uso de hidrógeno en secciones sin infraestructura eléctrica, optimizando así la eficiencia energética global.

En términos operativos, el FLIRT H₂ ofrece una autonomía superior a 460 km, una velocidad máxima de 127 km/h y tiempos de repostaje inferiores a 30 minutos. Está disponible en configuraciones de dos a cuatro coches, con una capacidad típica aproximada de 116 pasajeros.

Web del proyecto: <https://www.stadlerrail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt-h2>

Proyecto Siemens Mireo Plus H (Alemania)

El Siemens Mireo Plus H es una unidad eléctrica múltiple de pasajeros propulsada por hidrógeno desarrollada por Siemens Mobility con el objetivo de sustituir trenes diésel en la red de Bayerische Regiobahn (BRB), en Alemania. El proyecto inició operación en diciembre de 2024 y se presenta como uno de los primeros prototipos en servicio comercial que integra en un único vehículo un sistema híbrido avanzado compuesto por pila de combustible y batería de iones de litio. La propulsión combina una pila de combustible con una batería de alta seguridad que gestiona la entrega de potencia, el almacenamiento de energía recuperada en el frenado regenerativo y el suministro a sistemas auxiliares. Para maximizar la eficiencia energética y reducir emisiones acústicas, tanto los convertidores de potencia como los sistemas auxiliares incorporan tecnología de carburo de silicio (SiC). El almacenamiento de hidrógeno se realiza mediante tanques de Tipo IV ubicados en el techo del tren, compuestos por cilindros de presión con revestimiento no metálico reforzado con fibra de carbono y protegidos por una cubierta estructural. El sistema ha sido diseñado para ofrecer una autonomía de hasta 1.200 km, mientras que la pila de combustible cuenta con una vida útil proyectada de aproximadamente 30.000 horas de operación. En términos operativos, el tren permite un repostaje rápido de aproximadamente 15 minutos. El sistema admite preenfriamiento del hidrógeno en estación para optimizar los tiempos de carga y dispone

de puertos de llenado accesibles desde ambos lados del tren, lo que mejora la logística y evita maniobras adicionales durante el repostaje.

Web del proyecto: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus.html>

Proyectos de Innovación vehicular:

Proyecto FCH2RAIL (España-Portugal)

Proyecto de demostración (2021-2025) que validó la viabilidad técnica de un tren de pasajeros bimodal (catenaria + hidrógeno) en las redes ferroviarias española y portuguesa, con participación de CAF, Toyota y Renfe.

El tren incorpora 160 kg de H₂ a 350 bar (32 botellas tipo III), pilas de combustible Toyota Gen2 (6 × 80 kW) y una batería de apoyo (238 kWh), operando en modo híbrido. Alcanzó 804 km de autonomía, con un consumo medio de 0,22 kg H₂/km y 10.000 km de operación en modo hidrógeno.

El proyecto desarrolló una estación de repostaje de hidrógeno modular y transportable, capaz de repostar los 160 kg en unos 20 minutos (4 kg/min). Se identificó el repostaje rápido de alta capacidad como principal reto para la explotación comercial.

El H₂ se almacena en estado gaseoso comprimido (350 bar) a temperatura ambiente sin refrigeración; las pilas PEM emplean refrigeración líquida para operar entre 60-80 ° C.

Web del proyecto: <https://www.fch2rail.eu/>



Figura 21.- Tren FCH2RAIL, licencia [CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/). Fuente: CAF

Proyecto Hympulso (IDAE España)

El proyecto Hympulso (2023-2026), liderado por Talgo, tiene por objeto tanto la integración de un sistema híbrido de H₂+baterías en un tren de alta velocidad/Intercity (Talgo 250), convirtiéndolo en la primera unidad dual (EMU+ HEMU) con alta interoperabilidad en tramos con (bitensión: 25 kVCA de líneas alta velocidad y 3 kVCC de la red convencional) o sin catenaria y de diferentes anchos de vía (al disponer de sistema de ancho de vía automático adaptable a redes con ancho convencional o internacional), así como de alta velocidad y larga distancia, como el desarrollo integral de la cadena de valor, incluyendo para ello tanto la producción del H₂ renovable, como el desarrollo de la logística de suministro y repostaje a la unidad ferroviaria.

El prototipo contará con importantes innovaciones en la cadena de tracción: sus convertidores con alta eficiencia, modelos de ventilación pasiva segura, un modelo de conducción que optimice el uso de las distintas fuentes de energía para un trayecto concreto sobre un gemelo virtual o la aplicación de la fabricación aditiva para mejorar el peso y la durabilidad en los equipos, mejorando aún más la eficiencia y, en definitiva, su contribución con la descarbonización de la movilidad.

Web del proyecto: <https://www.talgo.com/es/>

Proyecto FP4-Rail4EARTH (Europe' s Rail JU)

El proyecto FP4-Rail4EARTH (2022-2026), impulsado por Europe' s Rail Joint Undertaking, tiene como objetivo mejorar la sostenibilidad del sistema ferroviario europeo y contribuir a la neutralidad climática en 2050. La iniciativa se centra en el desarrollo y la preestandarización de soluciones ferroviarias de propulsión alternativa, incluyendo trenes de baterías (BEMU) y de hidrógeno (H₂), así como en la optimización de la gestión energética a nivel de sistema. En el ámbito específico del hidrógeno, el proyecto define requisitos técnicos comunes a escala europea para futuros trenes, estableciendo como meta una autonomía mínima de 1.000 km, con un objetivo final de hasta 1.500 km, utilizando aproximadamente 250 kg de hidrógeno comprimido a 350 bar (CGH₂). Asimismo, se fija como referencia un tiempo de repostaje de 15 minutos, equiparable a la operatividad de los trenes diésel. Para ello, se trabaja en la estandarización de interfaces entre el material rodante y la infraestructura de repostaje, así como en sistemas avanzados de gestión energética que permitan optimizar el consumo y la integración operativa.

Web del proyecto: <https://rail-research.europa.eu/rail-projects/fp4-rail4earth/>

Proyecto HydroFLEX (Reino Unido)

El proyecto HydroFLEX constituye el desarrollo del primer tren híbrido de hidrógeno del Reino Unido, fruto de la colaboración entre Porterbrook y la Universidad de Birmingham. Su objetivo principal fue demostrar la viabilidad técnica de adaptar material rodante eléctrico existente para su funcionamiento con hidrógeno, permitiendo la operación autónoma en líneas no electrificadas.

El demostrador se basó en una unidad eléctrica múltiple (EMU) Clase 319 readaptada. A diferencia de configuraciones convencionales que alojan los equipos en el bastidor, el sistema de potencia se instaló en uno de los vagones para facilitar el acceso y las pruebas. La propulsión incorpora una pila de combustible Ballard HD100 de 100 kW y dos baterías de tracción de iones de litio con una capacidad combinada de 84 kWh, que cubren los picos de demanda energética.

El almacenamiento de hidrógeno se realiza mediante cuatro tanques Tipo III, con una capacidad total de 20 kg de H₂. La configuración híbrida permite operar bajo catenaria de 25 kV en tramos electrificados y cambiar a modo hidrógeno en secciones sin infraestructura eléctrica.

Aunque el proyecto logró demostrar la viabilidad técnica de la tracción por hidrógeno en la red ferroviaria británica, permaneció como iniciativa experimental y no evolucionó hacia una flota comercial, principalmente por condicionantes económicos y de escalabilidad.

Web del proyecto: <https://www.porterbrook.co.uk/innovation/hydroflex-cop>

Proyecto Hycerail (España)

El proyecto [Hycerail](#), impulsado por el Instituto para la Transición Justa (ITJ) y CIUDEN, tiene como objetivo demostrar la viabilidad del hidrógeno renovable como alternativa al diésel en líneas ferroviarias no electrificadas, utilizando como banco de pruebas la infraestructura del tren turístico Ponfeblino en el entorno de Villablino (León). A diferencia de los trenes basados en pila de combustible, Hycerail emplea un enfoque H₂-ICE, integrando un motor de combustión interna alimentado con hidrógeno en un automotor rehabilitado, con el objetivo de validar la solución en operación real y con requisitos de infraestructura más próximos a una reconversión de material existente. Las primeras pruebas en vía se realizaron a finales de 2025, inicialmente en los primeros 11 km del trazado, donde circulará el Ponfeblino.

El proyecto se apoya en un esquema local de producción y logística de hidrógeno asociado a CIUDEN, orientado a cerrar el ciclo de suministro para la movilidad ferroviaria. Además del valor demostrador, Hycerail persigue reactivar la infraestructura histórica del Ponfeblino como plataforma tecnológica y replicable para otras líneas regionales no electrificadas, evaluando

condiciones de explotación, mantenimiento y seguridad vinculadas al uso de hidrógeno como combustible ferroviario.

Proyectos de Innovación transversal:

Proyecto “Hydrogen Risk” (UIC)

El proyecto HYDROGEN RISKS es una iniciativa impulsada por la UIC (Union Internationale des Chemins de Fer) cuyo objetivo es preparar al sistema ferroviario para la integración segura del hidrógeno como vector energético. Su foco no está en el desarrollo de trenes o infraestructuras físicas, sino en analizar, estructurar y armonizar la gestión de riesgos asociados al hidrógeno en el ferrocarril, abordando toda la cadena de valor —producción, almacenamiento, distribución y uso a bordo— y comparando explícitamente estos riesgos con los del amoniaco como combustible alternativo.

La iniciativa se desarrolla como un proyecto marco de seguridad y normalización, orientado a generar conocimiento transversal antes de la adopción masiva del hidrógeno, a alimentar futuras guías técnicas, procesos de análisis RAMS y decisiones regulatorias en un contexto de creciente despliegue de demostradores ferroviarios de hidrógeno, desarrollándose a partir de las reducidas experiencias y estudios previos, entre los que destacan los ensayos realizados por Renfe, Enagás y el CNH2 en el año 2020 en las instalaciones de la Fundación Barredo en Asturias, en el marco del proyecto CEF RaiLNG, en los que se simuló a escala real el efecto de fugas de H2 en un entorno ferroviario sometido a los principales condicionantes para el ferrocarril: un túnel con catenaria, anticipando sus resultados el tipo de medidas mitigantes a adoptar tanto a nivel de vehículo como de infraestructura.

Entre sus objetivos principales destacan: consolidar resultados de análisis de riesgos existentes, armonizar criterios de seguridad entre operadores, fabricantes y gestores de infraestructuras, crear una biblioteca de buenas prácticas reutilizables, y reducir la incertidumbre regulatoria que hoy actúa como barrera para el despliegue del hidrógeno en ferrocarril. HYDROGEN RISKS actúa así como un habilitador estratégico, asegurando que la transición tecnológica hacia el hidrógeno pueda realizarse de forma segura, comparable y defendible.

Web del proyecto: <https://uic.org/projects-99/article/hydrogen-risks>

8.2. Anexo: Propiedades del H2

Tabla 10.- Propiedades físico-químicas del hidrógeno. Propiedades en condiciones de referencia ISO: 15 °C y 1,013 bar para volumen y 15 °C para cálculos de combustión. Fuente: Enagás

Propiedades físico-químicas	
Peso molecular (kg/kmol)	2.0159
Densidad (kg/m ³)	0.0899
Densidad relativa	0.0696
Poder calorífico superior (MJ/kg)	141.948
Poder calorífico superior (kWh/m ³)	3.5523
Poder calorífico superior (MJ/m ³)	12.103
Índice de Wobbe Superior (kWh/m ³ (n))	13.4684
Calor específico, C _p (kJ/kg.K)	14.268
Coefficiente Joule-Thompson (K/bar)	-0.028
Velocidad del sonido (m/s)	1293.9
Viscosidad (mPa.s)	0.00871
Conductividad térmica (W/m.K)	0.1815
Punto de ebullición (K)	20.3
Punto de fusión (K)	14
Coefficiente de difusión en aire (m ² /s)	0.69
Temperatura de llama en aire (K)	2318

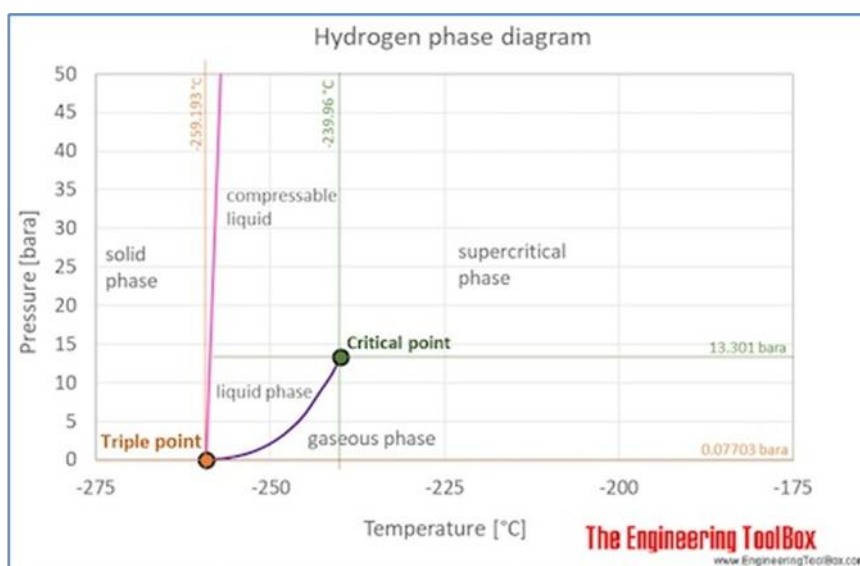


Figura 22.- Diagrama de fases del hidrógeno. [48]

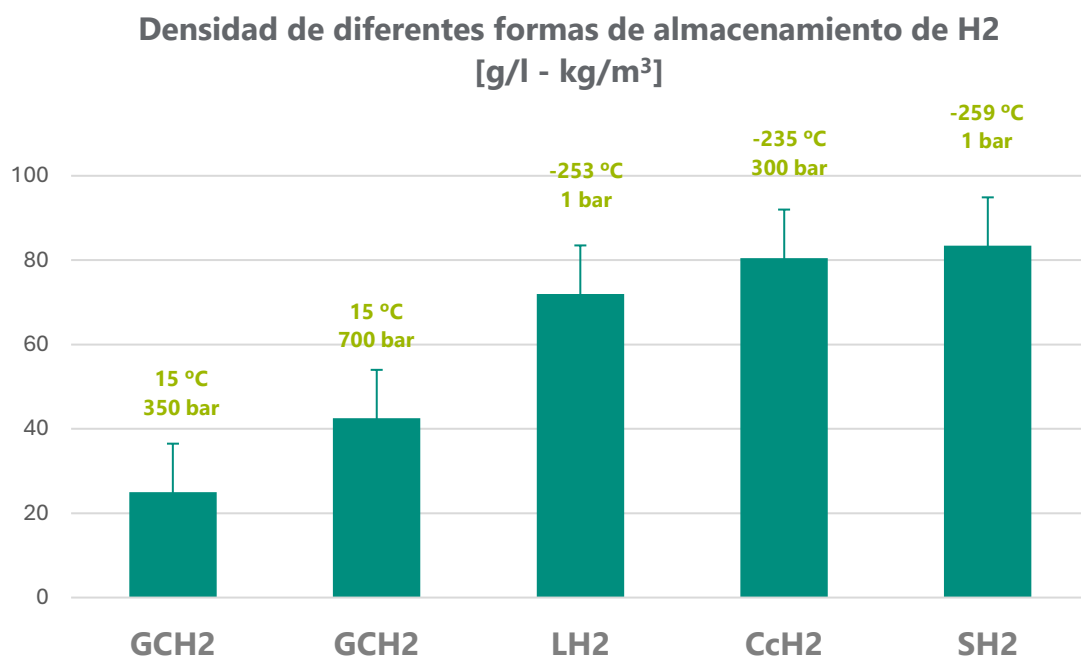


Figura 23.- Densidad energética del hidrógeno en función de la presión y/o temperatura. Fuente: Elaboración propia



Figura 24.- Densidad energética del hidrógeno en función de la presión y/o temperatura. Fuente: Elaboración propia

GCH₂: Hidrógeno comprimido

LH₂: Hidrógeno licuado

CcH₂: Hidrógeno crio-comprimido

SH₂: Hidrógeno sólido (estado *slush*)

Tabla 11.- Poder calorífico inferior y densidad energética volumétrica de combustibles convencionales vs. hidrógeno [17].
[49]

Combustible	Poder calorífico inferior (MJ/kg)	Densidad energética volumétrica (MJ/l)
Gasolina	43,2	32
Diésel	43,1	35,7
Diésel sintético (FT/HVO)	44	-
H₂ 350 bar	120	2,8
H₂ 700 bar	120	4,7
H₂ líquido (LH₂)	120	8
H₂ crio-comprimido (CcH₂)	120	9,6
H₂ sólido (estado slushSH₂)	120	~10

8.3. Anexo: Normativa de calidad de H2 como combustible

En los sistemas de movilidad basados en hidrógeno, la calidad del combustible constituye un aspecto crítico para garantizar el correcto funcionamiento, la durabilidad y la seguridad de los sistemas de propulsión, especialmente en aplicaciones que emplean pilas de combustible. La presencia de determinadas impurezas en el hidrógeno puede afectar negativamente al rendimiento de estos sistemas, provocar degradación de los catalizadores o generar problemas operativos en los equipos de almacenamiento, distribución y repostaje. Por este motivo, la industria ha desarrollado normas específicas que establecen los requisitos de pureza y los límites máximos de contaminantes admisibles en el hidrógeno destinado a su uso como combustible. Las dos principales normas de referencia hoy en día son la **ISO 14687:2025** y la **EN 17124:2022**. A nivel internacional, la referencia principal es la **norma ISO 14687:2025**, que define las especificaciones de calidad del hidrógeno como combustible para diferentes aplicaciones energéticas, incluyendo su utilización en pilas de combustible para transporte terrestre. Esta norma establece mínimos de hidrógeno según la aplicación y los valores máximos permitidos para una serie de contaminantes potencialmente presentes en el hidrógeno, así como otros parámetros fisicoquímicos relevantes. En la utilización del hidrógeno para movilidad, la norma diferencia el hidrógeno según:

- **Tipo I:** hidrógeno gas.
- **Tipo II:** hidrógeno líquido.

Que a su vez se puede dividir en:

- **Grado C:** hidrógeno para aplicaciones en pilas de combustible o motores de combustión interna en vehículos fuera de carretera (off-road).
- **Grado D:** hidrógeno para aplicaciones en pilas de combustible o motores de combustión interna en vehículos de carretera (road) y fuera de carretera (off-road).
- **Grado F:** hidrógeno para motores de combustión interna en vehículos.

La Tabla 12 muestra la concentración mínima de hidrógeno exigida para cada tipo/grado, así como la máxima de algunos de los principales contaminantes.

A nivel europeo existe la **norma EN 17124:2022**, que especifica las características de calidad del hidrógeno suministrado a vehículos eléctricos de pila de combustible tipo PEM. Los requisitos de calidad coinciden con el hidrógeno Tipo I, Grado D de la norma ISO 14687:2025.

En cualquier caso, hay que tener en cuenta que ambas normas establecen límites adicionales para otros componentes traza (como CO, CO₂, ...) que hay que tener en cuenta y cuyas limitaciones exactas se describen en las correspondientes normas. Igualmente, es necesario consultar las normas para ver los requisitos/limitaciones adicionales impuestas a la calidad del H₂.

Tabla 12.- Especificaciones de calidad del hidrógeno como combustible aplicadas a vehículos, según ISO 14687:2025 y EN 17124:2022

Componentes	Tipo I y Tipo II Grado D	Tipo II Grado C	Tipo I Grado F
Hidrógeno	≥ 99,97%	≥ 99,995%	≥ 98,0%mol
Gases totales distintos del hidrógeno	≤ 300 μmol/mol	≤ 50 μmol/mol	≤ 2 %mol
Concentración máxima de contaminantes individuales			
Agua (H ₂ O)	≤ 5 μmol/mol	a	≤ 5 μmol/mol
Metano (CH ₄)	≤ 100 μmol/mol	b	≤ 100 μmol/mol
Otros			
Helio (He)	≤ 300 μmol/mol	b	-
Nitrógeno (N ₂)	≤ 300 μmol/mol	a	-
Argón (Ar)	≤ 300 μmol/mol	≤ 39 μmol/mol	-
a) Nitrógeno, agua e hidrocarburos combinados: máximo 9 μmol/mol.			
b) Oxígeno y argón combinados: máximo 1 μmol/mol.			

8.4. Anexo: Aspectos de seguridad

En el contexto de la regulación de atmósferas explosivas (ATEX) [50], los instrumentos para utilización en zonas con presencia de hidrógeno deben pertenecer al grupo IIC, que aplica a aquellos gases inflamables que tienen las siguientes características

- Intersticio experimental máximo de seguridad/Maximum Experimental Safe Gap (MESG) in mm < 0.5
- Corriente de ignición mínima/Minimum Ignition Current (MIC) in mA < 0.45

La Tabla 13 muestra algunas de las principales propiedades del hidrógeno relacionadas con la seguridad.

Tabla 13.- Propiedades del hidrógeno referentes a seguridad. Fuente: Enagás

Principales propiedades de seguridad	Valor
Límite Inferior de Inflamabilidad (LII), mol%	4.0
Límite Superior de Inflamabilidad (LSI), mol%	77.0
Limiting Oxygen Concentration (LOC) in mol%	4.3
Temperatura de Auto Ignición (TAI/AIT), °C	560
Energía de Ignición Mínima (EIM/MIE), mJ	0.017
Intersticio experimental máximo de seguridad, (IEMS/MESG), mm	0.29
Presión de explosión máxima, p_{max} , bar	8.3
Valor K_G , bar x m/s	990
Velocidad de combustión laminar (S_L), m/s	3.12

Información más extensa sobre diferentes aspectos de seguridad relacionados con el hidrógeno se puede encontrar en las siguientes páginas web⁶:

- **HySafe**: International Association for Hydrogen Safety, <https://hysafe.info/>.
- **Chemsafe**: Database for safety characteristics in explosion protection, <https://www.chemsafe.ptb.de/home>.
- **HyTools**: Hydrogen tools, <https://h2tools.org/>.
- **HyResponder**: European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders, <https://hyresponder.eu/>.

⁶ Consultadas el 26 de marzo de 2026