

# Hacia un ferrocarril aún más sostenible

## Towards an Even More Sustainable Railway

Imanol Iturrioz Villalba<sup>1\*</sup>

### Resumen

Si bien el ferrocarril en general es el medio de transporte colectivo más limpio, todavía un porcentaje sustancial de las líneas no están electrificadas y por ellas circulan trenes diésel donde existe todavía margen de descarbonización.

La evolución en los últimos años tanto de las tecnologías de acumulación eléctrica como de pilas de combustible ha permitido tener una alternativa a la electrificación de estas líneas, que debido a su alto coste ha sido un freno a la descarbonización.

El artículo profundiza en estas tecnologías para ver como de cerca están de ser una alternativa sólida.

**Palabras clave:** ferrocarril sostenible, hidrógeno, baterías de combustible, nuevos sistemas de tracción ferroviarios.

### Abstract

*Although railways in general are the cleanest means of public transport, a substantial percentage of lines are not yet electrified and diesel trains run on them, thus leaving ample room for decarbonisation.*

*Developments in recent years in both electric storage and fuel cell technologies have provided an alternative to the electrification of these lines, whose high cost has been an obstacle to decarbonisation.*

*The article takes a closer look at these technologies to see how close they are to being a solid alternative.*

**Keywords:** Sustainable railways, hydrogen, fuel batteries, new rail traction systems.

## 1. INTRODUCCION

En los últimos años, el cambio climático ha pasado a ser una prioridad a nivel mundial. El Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*) ha establecido el objetivo de alcanzar la neutralidad climática europea para 2050 y esto supone reducir drásticamente las emisiones, de manera que sólo se emita lo que la tierra es capaz de absorber.

Con este objetivo, además de fomentar la descarbonización de la economía, se quiere generar una nueva economía verde que permita reducir las emisiones a la vez que se generan nuevos puestos de trabajo. Esta estrategia de crecimiento se ha erigido en Europa como una de los pilares para reparar los daños provocados por la crisis del coronavirus y para propiciar un futuro mejor para la próxima generación.

El transporte también se suma a esta lucha por el medio ambiente, y en ese contexto la Comisión Europea publicó en diciembre de 2020 la *Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente* que establece un objetivo de reducción de emisiones del 90 % para 2050.

Dentro de la movilidad, el ferrocarril parte de una posición muy favorable. El transporte representa una cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión Europea: el transporte por carretera supone el 71,8 % de las emisiones y el transporte por ferrocarril únicamente el 0,4 %. Este bajo nivel de emisiones se deriva de la alta

eficiencia del ferrocarril (tanto en rendimientos como en resistencia al avance) y de un alto grado de electrificación.

Pero esta posición favorable no le exime de seguir contribuyendo en la reducción de emisiones.

Los vehículos eléctricos alimentados por catenaria son ya potencialmente verdes, ya que el nivel de emisiones depende únicamente de las emisiones generadas al producir la electricidad, por lo que si son alimentados con energía renovable son un transporte cero-emisiones. Los esfuerzos en la reducción de las emisiones deben por lo tanto centrarse en los vehículos diésel que circulan por líneas no electrificadas.

Actualmente, aproximadamente el 50 % de las vías europeas están sin electrificar. Este porcentaje es menor en España (37 %, 5.600 km) y en los países vecinos (Portugal y Francia), pero supone en todo caso un porcentaje elevado.

Varios programas de electrificación están en marcha, pero requieren de altas inversiones y largos plazos para materializarse. Además, si bien las líneas no electrificadas suponen un porcentaje elevado, estas soportan un tráfico reducido que no justifica, en muchos de los casos, el elevado coste asociado a la electrificación y su mantenimiento. En el caso de España, aunque el porcentaje en km de líneas no electrificadas es del 37 %, solamente circulan por ellas el 13 % de los vehículos de pasajeros.

Por lo tanto, las líneas de trabajo en materia de sostenibilidad se centran en las alternativas a los trenes diésel que no requieran la electrificación de las líneas.

Las baterías y el hidrógeno se han erigido como las alternativas cero emisiones a los trenes diésel. A continuación

\* Mail: [iiturrioz@caf.net](mailto:iiturrioz@caf.net)

<sup>1</sup> Ingeniero industrial y arquitecto. R&D Department. CAF.

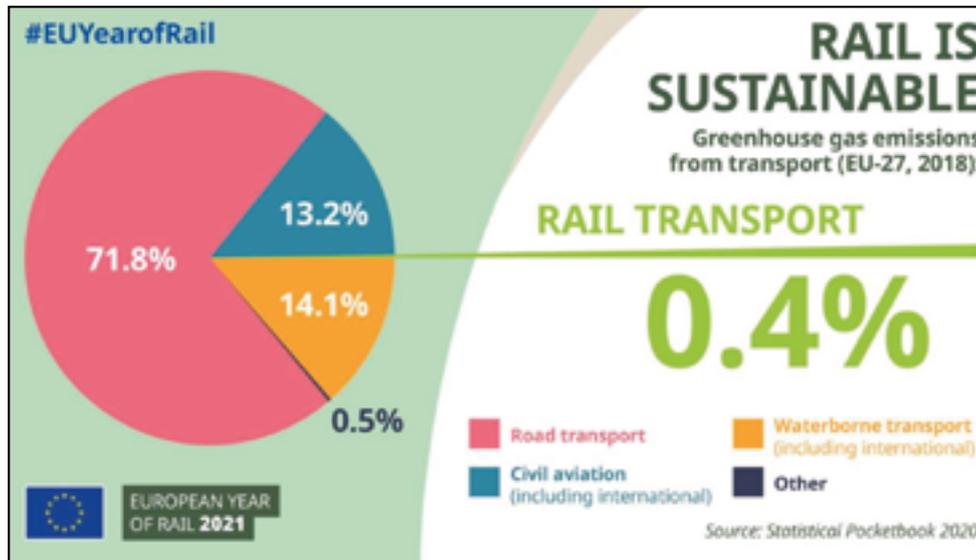


Figura 1. Porcentaje de emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el ferrocarril.

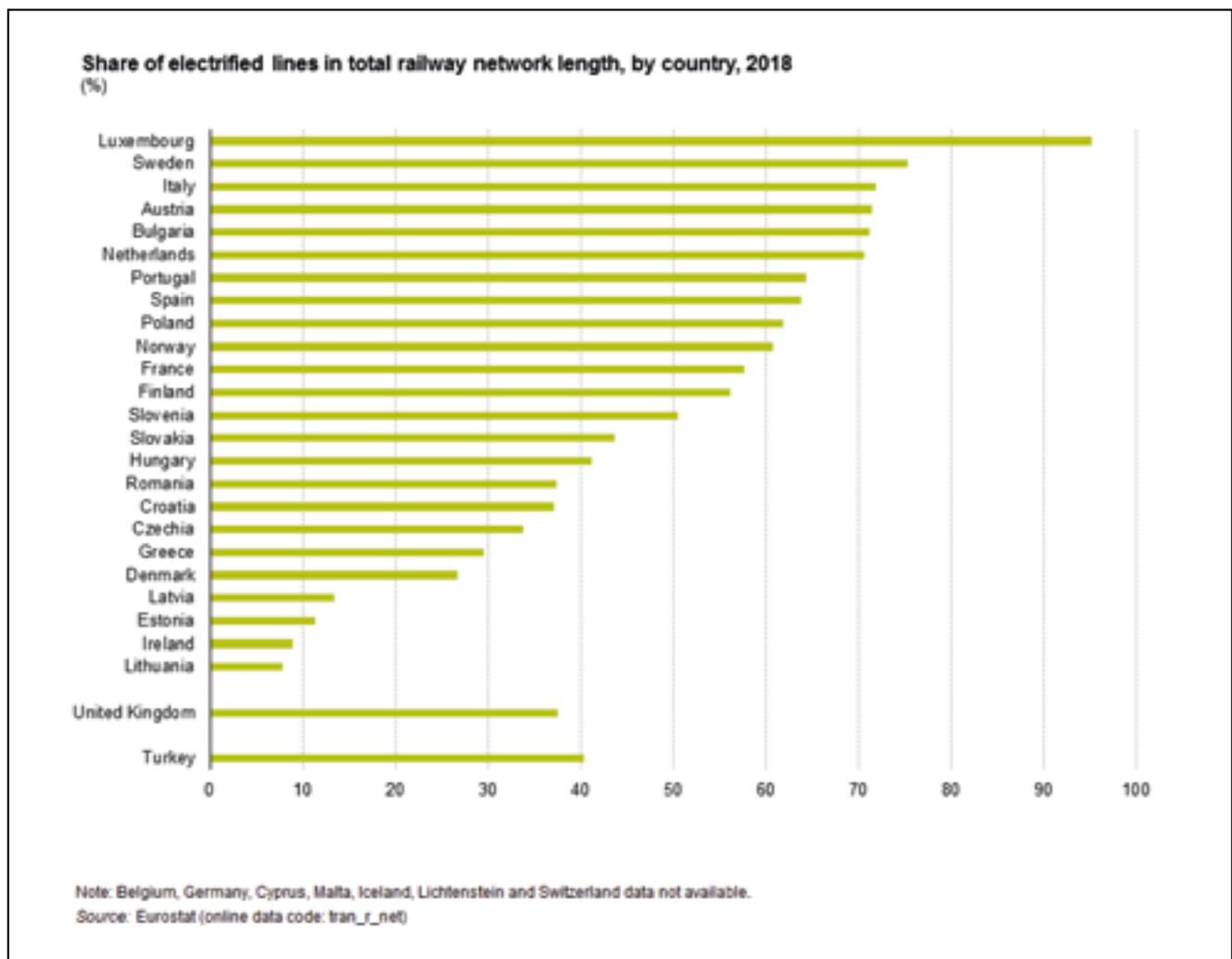


Figura 2. Porcentaje de kilómetros electrificados en las líneas europeas.

se hace una valoración de cada una de las tecnologías en su aplicación ferroviaria.

## 2. BATERÍAS

En este caso la energía principal para impulsar el tren y alimentar las cargas auxiliares proviene de las baterías.

Las baterías son dispositivos electroquímicos en los que la energía se puede almacenar y descargar a través de una reacción química reversible.

El origen de las baterías se remonta a principios del siglo XIX. A mediados del siglo XIX se desarrolló la batería de plomo-ácido que a día de hoy sigue teniendo un uso muy extendido. A finales del siglo XIX se desarrolló

la batería de Niquel-Cadmio (NiCd) y a finales del siglo XX, la batería de Niquel Metalhidruro (NiMh). Este último tipo de batería fue utilizado en los primeros coches eléctricos híbridos como el Toyota Prius. La batería de Litio es la tecnología utilizada mayoritariamente en la actualidad en numerosas aplicaciones, entre ellas la movilidad eléctrica.

CAF fue precursor en el suministro de vehículos con almacenamiento de energía embarcada, inicialmente con prototipos para tranvías capaces de operar sin catenaria (2008), y actualmente cuenta con más de 10 proyectos basados en este tipo de tecnología en todo el mundo, como por ejemplo, Sevilla, Zaragoza, Luxemburgo, Edimburgo o Kaohsiung (Taiwán).

Recientemente CAF ha sido seleccionado por las autoridades de transporte de Verkehrsverbund Rhein-Ruhr (VRR) y Nahverkehr Westfalen-Lippe (NWL) de las regiones alemanas de Rhein-Ruhr (la metrópoli más grande de Alemania) y Westphalia, respectivamente, para suministrar más de 60 trenes regionales propulsados por baterías, lo que representa en la actualidad la adjudicación de BEMUs (*Battery Electric Multiple Unit*) más grande del mundo.

Dentro de la familia de las baterías de Litio, las celdas empleadas pueden tener diferentes químicas, donde la clasificación se realiza en función de la composición de los

electrodos positivo y negativo que forman parte de la reacción química reversible citada anteriormente. Para la aplicación ferroviaria distinguimos principalmente 3 tipos de baterías:

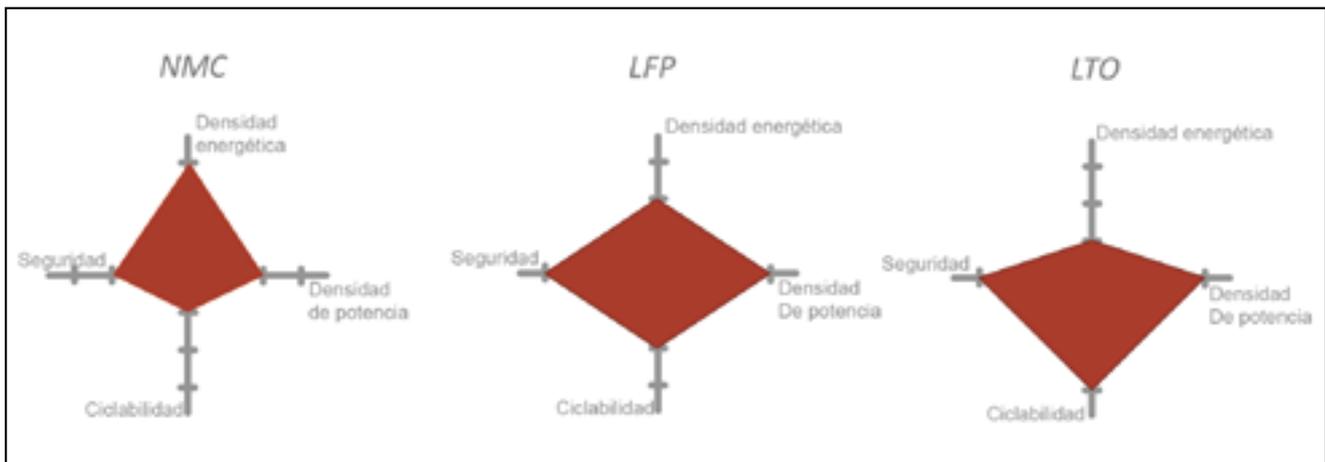
**Tabla 1.** Tipos de baterías en función de su química

	Cátodo (+)	Ánodo (-)
<b>NMC</b>	Nickel Manganeso Cobalto	Grafito
<b>LFP</b>	Litio Hierro Fosfato	Grafito
<b>LTO</b>	Nickel Manganeso Cobalto o Litio Hierro Fosfato	Litio Titanato Oxido

Cada tipo de batería presenta unas características diferenciadas, y la elección se realiza en función de las necesidades de cada aplicación.

El estado del arte de la tecnología predominante en la tracción ferroviaria es la LTO, debido a que la mayoría de los vehículos operan en tramos sin catenaria de manera parcial, permitiendo una disponibilidad de energía muy rápida en los tramos con catenaria para afrontar tramos sucesivos sin electrificar.

Las celdas de baterías se integran para conformar los Sistemas de Acumulación de Energía Embarcados (OESS, *On-Board Energy Storage Systems*).



**Figura 3.** Características de los diferentes tipos de baterías.



**Figura 4.** Ejemplo de un OESS con un DCDC, tres paquetes de baterías y un BTMS.

Estos son los subsistemas más importantes que conforman el OESS:

1. Paquetes de baterías (ESU, *Energy Storage Units*).

Consiste en la integración de varios módulos de baterías con las interfaces mecánicas, eléctricas, hidráulicas y de comunicación adecuadas. La tensión y la potencia resultante del paquete de baterías pueden llegar a varios cientos de voltios y kilowatios. También se añaden elementos de gestión de batería (BMS, *Battery Management System*) y diversos elementos de protección como contactores y fusibles.

- Módulos de baterías: es la integración de varias celdas en configuraciones serie-paralelo donde cada celda es monitorizada en temperatura y tensión para su equilibrado con una tarjeta electrónica dedicada. El módulo, a su vez, puede disponer de un sistema de refrigeración de las celdas.
- Celdas: es la unidad de almacenamiento mínima. Pueden ser de diferente amperaje, y el formato mecánico difiere en 3 opciones: prismática, *pouch* o cilíndrica.

2. Sistema de gestión térmica de las baterías (BTMS, *Battery Thermal Management System*).

Este equipo es quien proporciona el caudal y la temperatura adecuada al refrigerante (normalmente líquido) que se usa en los módulos de baterías. La temperatura del refrigerante suele controlarse entorno a los 20 °C para que las celdas no sufran de degradación prematura, refrigerando las celdas en uso normal, y precalentándolas al inicio de la operación, si fuese necesario.

3. Convertidor de potencia DC/DC.

La función de este sistema es la conversión de la potencia que fluye entre las baterías y el inversor de tracción. Los voltajes de ambos equipos suelen diferir en valor y van variando, por lo que el convertidor se encarga de adecuar la potencia de carga y descarga de las baterías en base a la potencia demandada por el inversor de tracción. El convertidor puede tener diferentes arquitecturas, pero el núcleo del mismo está compuesto por semiconductores de conmutación rápida, algunos componentes inductivos y otros elementos de control y protección.

A la hora de valorar la idoneidad de la tecnología para la aplicación ferroviaria, las siguientes características son esenciales y permiten además comparar diferentes tecnologías.

### Vida de las baterías

Su elevada ciclabilidad (más de 20.000 ciclos antes de terminar su vida útil) hace que la tecnología LTO sea muy ventajosa en términos de Coste Total de Propiedad (TCO, *Total Cost of Ownership*), ya que los vehículos ferroviarios pueden superar los 30 años en operación. Es habitual diseñar los trenes para que la vida útil de las baterías alcance los 15 años, planteando únicamente una sustitución a lo largo de la vida del tren (30 años).

### Eficiencia

La eficiencia de una batería de Ion Litio es muy alta, pudiendo superar el 90 %. Además, las baterías permiten recuperar la energía de la frenada del vehículo ayudando a la reducción del consumo total en la operación.

### Madurez

Las baterías de Ion Litio son hoy en día una tecnología madura con más de 30 años en el mercado, pero aun así en constante evolución y mejora en lo que se refiere a sus prestaciones y coste.

### Seguridad

Las baterías LTO ofrecen una elevadísima seguridad intrínseca a su composición que se combina con barreras térmicas frente al fuego que añaden al producto integrado una seguridad adicional ante posibles incidencias.

### Autonomía

La densidad energética de las baterías se ha visto también incrementada de forma significativa en los últimos años lo que ha permitido integrar baterías con mayor capacidad. Hoy en día es posible superar el umbral de los 100 km de autonomía en uso nominal, logrando así dar cobertura a la sustitución de trenes regionales diésel en determinados servicios.

El rango superior a los 100 km se obtiene gracias al uso de 700 kWh de baterías de Ion Litio de última generación, que además de ofrecen unas características muy adecuadas para la aplicación ferroviaria por la potencia de carga ultra-rápida (<15min), la elevadísima ciclabilidad y la máxima seguridad –prioridad absoluta en un vehículo de pasajeros.

### Coste

En términos generales, el coste de las baterías de Ion Litio se ha reducido en un 97 % en 30 años, y sigue en continuo descenso con una velocidad que equivale a reducir el coste a la mitad cada 4 años sin que se vea todavía una disminución en este ritmo.

### Líneas futuras

En la siguiente década las baterías van a acelerar su evolución en cuanto a prestaciones y coste. Sectores como la automoción, donde varios fabricantes han anunciado el abandono de la fabricación de vehículos de combustión, están impulsando fuertemente el desarrollo de nuevas baterías de mayor rango, mayor durabilidad y menor peso y coste. A modo de ejemplo, se espera que, antes de que termine la década, la densidad de las baterías sea el doble con la introducción de la tecnología del electrolito sólido, actualmente en desarrollo, pero con grandes expectativas para lograr productos competitivos en el medio plazo.

Sin embargo, sería mucho simplificar que los únicos desarrollos futuros vengan de la mejora de la química de

las celdas, pues también el resto de los componentes como los módulos y packs, los sistemas de refrigeración, las electrónicas de control, así como los semiconductores también están avanzando más que nunca debido a la explosión de la descarbonización o la robotización.

Finalmente, la integración conjunta de estas tecnologías en el vehículo, junto con la infraestructura eléctrica y la operación, serán la clave para realizar una propuesta de valor diferenciadora, y no parece descabellado proyectar que la autonomía de los trenes regionales de baterías pase del umbral de los 100 km actuales a 500 km en unos pocos años.

En definitiva, próximamente veremos como un sector tradicionalmente conservador como el ferrocarril avanzará a alta velocidad en nuevos sistemas de propulsión para trenes de pasajeros que después evolucionarán para vehículos más pesados como las locomotoras.

### 3. HIDRÓGENO

Los trenes propulsados por hidrógeno emplean pilas de combustible (*Hydrogen Fuel Cells*) para generar energía eléctrica a partir del hidrógeno embarcado en depósitos de alta presión. Esta electricidad alimenta a los equipos de tracción y los equipos auxiliares del vehículo como la catenaria alimenta a un tren eléctrico.

Las pilas de combustible son elementos electroquímicos que transforman el hidrógeno ( $H_2$ ) almacenado y el oxígeno ( $O_2$ ) que se capta del aire en electricidad y como producto residual generan agua ( $H_2O$ ). Por lo tanto, los vehículos de hidrógeno sólo emiten vapor de agua a la atmósfera.

Cuando se habla de un tren de hidrógeno realmente se trata de un sistema híbrido compuesto por pilas de combustible y baterías que funcionan conjuntamente. Las baterías complementan a las pilas de combustible ya que estas no pueden responder a las variaciones rápidas en la demanda de potencia y, además, no pueden absorber la energía regenerada en la fase de frenado. El vehículo de hidrógeno incluye por lo tanto un sistema de baterías como

el descrito en el apartado anterior, pero con una capacidad menor, ya que una gran parte de la energía necesaria la generan las pilas de combustible.

Hay que remontarse hasta el siglo XIX para encontrar las primeras referencias de las pilas de combustible, pero no es hasta la segunda mitad del siglo XX cuando las pilas experimentan un avance tecnológico importante.

En los años 70 y 80 del siglo pasado, la crisis del petróleo vuelve a dar un empujón a la tecnología y, finalmente, es ya en el siglo XXI cuando vemos pilas comerciales para aplicaciones en movilidad.

Al igual que sucede con las baterías de Litio, en el caso de las pilas de combustible, también existen diferentes tecnologías, pero es claramente la llamada PEM (*Proton Exchange Membrane*) la más común sobre todo en el sector de la movilidad debido a su mayor rendimiento y su baja temperatura de trabajo.

CAF lleva años trabajando esta tecnología y ya desde 2014, Solaris, la empresa de Grupo CAF dedicada al sector del autobús, ha obtenido contratos para autobuses de hidrógeno en varias ciudades europeas (Hamburgo, Riga, Bolzano, Colonia, Wuppertal y varias ciudades al sur de Holanda). En junio de 2019, Solaris lanzó al mercado su modelo Urbino 12 Hydrogen propulsado por hidrógeno.

La misma tecnología es la que se está utilizando en el tren. De hecho, las pilas de combustible empleadas en el autobús y en el tren son las mismas y solamente cambia el número de pilas instaladas hasta alcanzar la potencia necesaria.

En el sector del ferrocarril, CAF está diseñando su prototipo de tren de hidrógeno basado en un tren Civia de Renfe. Este proyecto (FCH2Rail), liderado técnicamente por CAF y realizado en consorcio con Renfe, Toyota, Adif, IP, CNH2, Stemann y DLR, ha obtenido una importante subvención de la unión europea.

En este demostrador se instalarán los siguientes componentes de la cadena de tracción de hidrógeno: los depósitos de hidrógeno, las pilas de combustible (*Fuel Cells*) con sus equipos auxiliares, el sistema de baterías con sus



Figura 5. Vehículo demostrador del proyecto FCH2Rail.

equipos auxiliares y el convertidor DC/DC bidireccional y aislado para alimentar el inversor de tracción.

Este proyecto, además de probar el tren en vía tanto en España como en Portugal, busca los siguientes objetivos:

- Alcanzar distintos niveles de homologación en 3 países europeos (España, Portugal y otro país por determinar).
- Proponer un marco normativo para la puesta en servicio de trenes propulsados mediante pilas de combustible, identificando las carencias del marco regulatorio vigente (TSI y EN), y proponiendo modificaciones de las normas actuales para permitir la obtención de autorización para operar este tipo de trenes. Estas propuestas serán presentadas a CEN, CENELEC y la Agencia de Ferrocarriles de la Unión Europea.
- Analizar la competitividad de la tracción de la pila de combustible frente a las soluciones diésel existentes en diferentes líneas del Adif.
- Identificar y comparar soluciones innovadoras para mejorar la eficiencia energética de los sistemas de tracción híbridos de pila de combustible.

Tras este demostrador, CAF ha establecido el objetivo de poner un tren de hidrógeno en servicio de pasajeros a finales de 2023. Además, el conocimiento adquirido en el demostrador permitirá participar en licitaciones de nuevas flotas de hidrógeno, e incluso en licitaciones de transformaciones de trenes diésel a trenes de hidrógeno, a partir de 2022.

Como se ha explicado anteriormente, el vehículo de hidrógeno incluye, además de las baterías y sus componentes asociados, los siguientes elementos:

#### 1. Pilas de combustible

Agrupación de varias pilas de combustible en paralelo para conseguir la potencia requerida para la aplicación. La potencia de las pilas utilizadas está entre los 70 y los 100 kW y se integran grupos de 4 a 8 pilas por tren en función de las prestaciones requeridas y la longitud del tren.

Las pilas incluyen además ciertos periféricos como son los compresores de aire y las bombas del circuito refrigerante.

#### 2. Sistema de refrigeración

Las pilas de combustible requieren un potente circuito de refrigeración, ya que las pérdidas son del orden del 50 % y se evacúan en forma de calor. La refrigeración se realiza mediante dos circuitos de agua (de alta y baja temperatura) que se refrigera mediante ventilación forzada en radiadores que se instalan en el techo del tren.

#### 3. Depósitos de hidrógeno

Los depósitos del hidrógeno consisten en un conjunto de botellas de alta presión (350 bares) que se agrupan para adaptarse al volumen existente en el vehículo. Así como el peso del hidrógeno embarcado es bajo (alrededor de 200 kg), el peso de las botellas supone varias toneladas, incluso utilizando botellas

de clase IV realizadas en polímeros de alta densidad reforzados con fibra de carbono. Además, el volumen ocupado por el hidrógeno es a día de hoy el parámetro más limitante a la hora de dar autonomía al vehículo, ya que los 200 kg utilizados como referencia pueden llegar a ocupar un volumen de unos 8.000 litros cuando se comprime el gas a 350 bares. El incremento de la presión de almacenamiento a los 700 bares (con su consecuente reducción del volumen) es una línea de trabajo a futuro que tiene que solventar los aspectos relacionados con la seguridad y el consumo adicional que supone comprimir más el gas.

#### 4. Convertidor de potencia DC/DC

Al igual que en el caso de los sistemas de baterías, la función de este sistema es la conversión de la potencia que fluye entre las baterías y el bus DC del equipo de tracción.

A continuación, se describen las características más importantes de esta tecnología en su uso ferroviario.

### Vida de las pilas

La vida de las pilas de combustible ha venido incrementándose de forma importante en los últimos años y en la actualidad la vida teórica se encuentra alrededor de las 30.000 horas. Pero la vida real de las pilas depende de muchos factores de operación, y en la actualidad los fabricantes de pilas no garantizan vidas por encima de las 20.000 horas, lo que aplicado al régimen de operación habitual de un tren supone 4-6 años.

### Eficiencia

La eficiencia de la pila de hidrógeno depende de su punto de trabajo, pero está alrededor del 50 %. El uso del calor generado por las pilas de combustible para calefactar el tren puede paliar el bajo rendimiento, pero esta mejora sólo puede llevarse a cabo en periodos fríos.

### Madurez

Si bien las pilas de combustible llevan muchos años en el mercado, no hay experiencia suficiente de su comportamiento a medio y largo plazo en un entorno tan exigente como el ferroviario. Proyectos como el demostrador descrito permitirán a constructores y suministradores de pilas de combustible avanzar en el conocimiento del comportamiento real de las pilas.

### Seguridad

La seguridad de los vehículos de hidrógeno es un tema en el que se está trabajando actualmente. Los riesgos de llevar almacenado el hidrógeno a alta presión y, sobre todo, la posible acumulación de hidrógeno en caso de fuga en espacios cerrados como talleres, túneles y ciertas estaciones siguen siendo, a día de hoy, aspectos no normalizados y que suponen una barrera para la homologación de estos vehículos.

## Autonomía

La autonomía de un tren de hidrógeno depende de la cantidad de hidrógeno que se embarque. Debido a la baja densidad del hidrógeno, el volumen que ocupa es mucho mayor que el gasoil. En cualquier caso, se pueden conseguir autonomías del orden de los 800 km que pueden ser suficientes para la mayoría de los servicios operados actualmente con trenes diésel.

## Coste

El coste de ciclo de vida de los vehículos de hidrógeno es elevado.

El coste de adquisición se incrementa respecto a un vehículo eléctrico, ya que incluye muchos elementos adicionales, como son las pilas de combustible con sus componentes adicionales (depósitos, refrigeración, convertidores), así como las baterías y sus convertidores asociados.

El coste de operación se ve incrementado por el coste del hidrógeno. En el futuro, el coste del hidrógeno verde irá reduciéndose y el incremento en la eficiencia de las pilas de combustible reducirá también el consumo.

El coste de mantenimiento viene condicionado por la vida de las pilas de combustible y las veces que haya que remplazarlas durante la vida del tren.

Por último, no hay que olvidar que, asociado a los trenes de hidrógeno, está toda la infraestructura de abastecimiento de hidrógeno que obliga como mínimo a la instalación de hidrolineras en los puntos de repostaje de los vehículos.

## Líneas futuras de trabajo

Las pilas de combustible han evolucionado de forma importante en los últimos años y la extensión de su uso impulsará, sin duda, mejoras tanto en los aspectos técnicos como en sus costes.

Las líneas de trabajo principales en cuanto a la tecnología de las pilas de combustible son:

- Mejora de su rendimiento. A día de hoy, aproximadamente la mitad de la energía embarcada en forma de hidrógeno se desperdicia en forma de calor. Estas pérdidas son similares a las de un motor diésel pero en este caso, el combustible (el hidrógeno) tiene un coste bastante más elevado, por lo que toda mejora del rendimiento hace que esta tecnología sea más competitiva.
- Mejora de la vida útil. La vida útil de las pilas de combustible y de los depósitos es a día de hoy limitada; en torno a 5 años para las pilas y 13 para los depósitos. Esto requiere que estos componentes se replacen varias veces a lo largo de la vida del tren que puede oscilar entre los 30 y 40 años. Nuevas soluciones en estos componentes pueden reducir la necesidad de reemplazarlos y con ello reducir los costes de ciclo de vida.

Por otro lado, el coste del hidrógeno verde sigue siendo otra barrera importante para su uso. En este caso, también el incremento de su utilización favorecerá las reducciones

en coste, principalmente mediante el desarrollo de nuevas tecnologías de producción que mejoren el rendimiento de las actuales. Los electrolizadores de óxido sólido de altas temperaturas (SOEL, *Solid Oxide Electrolysis*) están alcanzando rendimientos muy elevados, pero todavía se encuentran en una fase experimental y a día de hoy tienen una durabilidad más reducida.

Establecer una red de distribución competitiva también es clave, ya que el suministro hasta los puntos de consumo supone un sobrecoste importante. El desarrollo de una red de distribución de hidrógeno o el emplear sin dañar la red de distribución de gas actual son unos aspectos que se están analizando en la actualidad.

## 4. CONCLUSIONES

El siguiente cuadro resume de forma cualitativa los parámetros principales que se han tratado en los apartados anteriores. Se incluyen como referencia los trenes eléctricos y diésel. Hay que tener en cuenta que las alternativas de baterías e hidrógeno sustituirán a trenes diésel y no a los eléctricos, pero permite comprobar que, desde el punto de vista del vehículo, los eléctricos son la solución óptima siempre y cuando técnica y económicamente sea viable la electrificación de la línea.

**Tabla 2.** Comparativa con tecnologías de propulsión

	Baterías	Hidrógeno	Diésel	Eléctrico
Vida de los componentes	+++	+	++++	+++++
Eficiencia	++++	+	+	+++++
Madurez	+++	+	+++++	+++++
Seguridad	+++	+	++++	+++++
Autonomía	+	+++	++++	+++++
Coste	+++	++	+++++	+++++
Emisiones estimadas	++++	+++	+	+++++

En todos los aspectos, la tecnología de las baterías supera al hidrógeno excepto en la autonomía. En el caso del ferrocarril, esta característica puede ser determinante y es por ello que puede inclinar la balanza en favor de la solución de hidrógeno en ciertas aplicaciones.

Tratándose de un parámetro clave, en la medida de cómo evolucionen las baterías en este aspecto irán incrementado su cuota de mercado.

En todo caso, las autonomías que proporciona incluso el hidrógeno están por debajo de las que se han venido especificando para los vehículos diésel, y esto va a suponer una gestión integral de la energía (vehículo, infraestructura y operación) que restará flexibilidad a la operación, pero que sin duda redundará en unas menores emisiones.

En base a la experiencia de haber trabajado con las dos tecnologías durante muchos años, y con varios vehículos ya en servicio, podemos concluir que no existe una tecnología que sea la idónea para todas las aplicaciones. En función de operación y sobre todo de la autonomía requerida se determinará la solución óptima.

Resumidamente, podríamos concluir que para servicios en los que las baterías alcanzan las autonomías requeridas o es viable una electrificación parcial de la línea, esta

tecnología es sin duda la más apropiada por coste, eficiencia y seguridad. En los casos en los que la autonomía necesaria no se pueda alcanzar con las baterías, entonces, los vehículos de hidrógeno son una alternativa válida, pero es necesario todavía despejar ciertas incertidumbres tecnológicas y que se concrete el marco normativo que permita homologar este tipo de vehículos. En la medida en que las baterías mejoren en el futuro sus prestaciones de autonomía, irán restando campo de actuación a las soluciones de hidrógeno.

## 5. REFERENCIAS

Berger, R. (2018). Fuel Cells and Hydrogen for Green Energy in European Cities and Regions, Vol. 1. *Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for European Regions and Cities*. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU). Múnich: Roland Berger GmbH.

Comisión Europea (2020). Staff Working Document. *Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente*.

Shift2Rail Joint Undertaking (S2R JU) (2019). *Study on use of Fuel Cells and Hydrogen in the Railway Environment*. <https://shift2rail.org/publications/study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment/>