

Documento de posicionamiento

**Innovación en gestión energética:
contribución del ferrocarril a la
movilidad sostenible**

Diciembre, 2021



SECRETARÍA TÉCNICA
PLATAFORMA TECNOLÓGICA FERROVIARIA ESPAÑOLA
Fundación de los Ferrocarriles Españoles
C/ Santa Isabel, 44 - 28012 Madrid
Tel.: (34) 91 151 10 83
E-mail: msacristan@ffe.es
www.ptferroviaria.es

I. INTRODUCCIÓN	5
II. ANÁLISIS GENERAL DE LA SITUACIÓN EN ESPAÑA.....	7
SERVICIOS FERROVIARIOS CON CC.....	7
SERVICIOS FERROVIARIOS CON CA.....	8
PROYECTOS TECNOLÓGICOS: ORIENTACIÓN AL ÁMBITO DE LAS NUEVAS REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES	8
OTROS VECTORES ENERGÉTICOS.....	9
GENERACIÓN CON ENERGÍAS RENOVABLES. AUTOCONSUMO	10
III. POLÍTICA Y MARCO NORMATIVO	10
NUEVOS VECTORES ENERGÉTICOS.....	11
AUTOCONSUMO	12
IV. CONSIDERACIONES TÉCNICAS GENERALES.....	12
V. INFRAESTRUCTURA.....	14
VI. MATERIAL MÓVIL.....	26
VII. EXPLOTACIÓN Y OPERACIÓN	31
VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	36
ANEXO	38
Principales hitos del uso de la energía eléctrica en el ferrocarril.....	38
Ámbito mundial.....	39
Ámbito nacional.....	40

ACRÓNIMOS Y DEFINICIONES

AIE. Agencia Internacional de la Energía.

CA. Corriente Alterna (instalación).

CC. Corriente Continua (instalación).

DAS (*Driver Advisory System*). Sistema que permite el intercambio de información entre el sistema ferroviario y el maquinista con el fin de optimizar la conducción del tren, obteniendo entre otros un ahorro energético.

DCS (*Data Collector System*). Aplicación informática que facilita el proceso de recolección de datos, permitiendo adquirir información estructurada y específica de manera sistemática, pudiendo posteriormente realizar el análisis de datos sobre la información.

DMU. Unidad de tren diésel (compuesta por varios vehículos).

EMS. Equipo de medida de energía embarcado.

EMU. Unidad de tren eléctrica (compuesta por varios vehículos).

EU-Rail JU. Iniciativa colaborativa para el desarrollo de I+D+i ferroviario a nivel europeo (continuación de la anterior iniciativa Shift2Rail).

FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*). Dispositivos estáticos que se controlan mediante sistemas informatizados de control de tecnología avanzada junto con electrónica de alta potencia. Se pueden utilizar para compensar desequilibrios, es decir, como compensadores de carga cuando se utilizan con algoritmos especiales de control. También se pueden utilizar para apoyar dinámicamente las caídas de tensión en la Línea de Transmisión y reducir los armónicos procedentes del material móvil.

GNL (*Gas Natural Licuado*). Gas natural en fase líquida a una temperatura de -160°C , por lo que se considera un líquido criogénico. Se almacena y transporta en recipientes altamente aislados para mantener su estado líquido. La ventaja del estado líquido es su menor volumen, pues por cada litro de GNL se obtienen aproximadamente 570 litros de gas natural gaseoso a temperatura ambiente. Está formado en un 95% por metano (CH_4) y contiene proporciones menores de etano, propano, butano, nitrógeno y dióxido de carbono. Es un combustible inodoro e incoloro que no es tóxico ni corrosivo.

Línea de Transmisión. Línea eléctrica de CC o CA (monofásica) por la que se transmite la energía que demanda el tren de la subestación eléctrica de tracción.

Red externa. Línea eléctrica de CA (trifásica) que alimenta la subestación eléctrica de tracción.

RFIG. Red Ferroviaria de Interés General.

SSEE. Subestación Eléctrica de Tracción.

TPS (*Traction Power System*). Parte del sistema eléctrico ferroviario que integra la Línea de Transmisión y las subestaciones eléctricas de tracción.

UE. Unión Europea.

UIC. Unión Internacional de Ferrocarriles.

I. INTRODUCCIÓN

En noviembre de 2016 la Plataforma Tecnológica Ferroviaria (PTFE) publicó una primera versión del documento de posicionamiento sobre *Gestión energética sostenible e inteligente en el ámbito ferroviario*. Como se indicaba entonces, la PTFE entendió que la gestión energética sostenible e inteligente en el ámbito de la investigación e innovación en el sector ferroviario sería un factor clave para favorecer la competitividad y asegurar el liderazgo de la industria ferroviaria.

El presente documento es una actualización del anterior, habida cuenta que el sector continúa estableciendo como una línea prioritaria de su estrategia esta temática debido, en gran parte, al coste económico pero también a la necesidad de los administradores y operadores ferroviarios de continuar potenciando y promocionando el transporte ferroviario como “transporte sostenible”.

La actualización del documento se realiza a finales de 2021, que ha sido el Año Europeo del Ferrocarril. Esta decisión fue adoptada por el Consejo de la UE en diciembre de 2020, teniendo relación con los esfuerzos de la UE para promover formas de transporte sostenibles como el ferrocarril, y en su compromiso de alcanzar la neutralidad climática para 2050 a través del *Pacto Verde Europeo*.

Aunque el transporte representa alrededor del 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la UE, el ferrocarril sólo es responsable del 0,4% de dichas emisiones. Se trata del único medio de transporte que ha reducido considerablemente sus emisiones desde 1990, lo que justifica su papel fundamental en la movilidad sostenible.

Lo anterior es debido, principalmente, a que el ferrocarril está fuertemente electrificado. Y es que cuando actualmente otros modos de transporte están intentando migrar hacia esa electrificación, el ferrocarril ya lo hizo a finales del siglo XIX en el marco de lo que se consideró la primera revolución tecnológica de este modo de transporte¹. Sin duda puede afirmarse que la electrificación ha sido y es el camino correcto para continuar reduciendo sus emisiones.

Pero hay que dejar claro que hablar de descarbonización no es hablar de *electrificación total*, debiendo evolucionar a otras soluciones complementarias. En España aproximadamente un 20% del tráfico ferroviario actual continúa siendo diésel por lo que hay que buscar otras alternativas para aquellas líneas en las que la electrificación no sea la mejor solución. Con estos antecedentes y en un entorno de transición energética, se evidencia que el futuro energético del ferrocarril va a ser híbrido, esto es, combinará soluciones de electricidad y gases renovables, potenciando el desarrollo de nuevas tecnologías asociadas.

La AIE, en una actualización de su informe *Energy Technology Perspectives*, avanzaba que el estado de madurez de las tecnologías de las que depende el conseguir la total descarbonización de la economía en 2050 es muy bajo (de entre un 2 y un 20% según segmento de actividad), y por este motivo enfatizaba en la necesidad de combinar la aceleración de los proyectos de desarrollo e innovación, con soluciones efectivas en materia de eficiencia energética.

¹ Para reforzar este hecho, y ser más conocido, en el Anexo final del presente documento se incluyen los principales hitos del uso de la energía eléctrica en el ferrocarril.

En este nuevo contexto se enmarca el presente documento de posicionamiento sobre *Innovación en gestión energética: contribución del ferrocarril a la movilidad sostenible*, que vuelve a analizar el papel de la innovación en la gestión energética en la infraestructura, en el material móvil y en la operación, así como las tendencias y aplicaciones futuras. El documento, coordinado de nuevo por el área de Investigación, Desarrollo e Innovación de ADIF, con la participación de empresas, centros tecnológicos y grupos de investigación de diferentes universidades asociadas a la PTFE, ha sido validado por el grueso de operadores y administradores ferroviarios nacionales, regionales y metropolitanos, e identifica nuevos retos y recomendaciones en dicho contexto, al tiempo que analiza la consecución y el estado de los que se recogieron en el primer documento.

Es importante destacar en este momento que los nuevos planteamientos y tecnologías van a ser promovidos en la nueva iniciativa tecnológica EU-Rail JU en su programa FA 4.

II. ANÁLISIS GENERAL DE LA SITUACIÓN EN ESPAÑA

España se encuentra inmersa actualmente en un periodo de transición energética con objetivos de descarbonización de la economía establecidos y vinculantes para 2030 y 2050 que afectan a todos los sectores y por tanto al del transporte. En este proceso el sector público jugará un papel esencial en el diseño de políticas y mecanismos para abordar los retos a los que se enfrentará en las próximas décadas.

Durante los últimos cinco años, la actividad tecnológica del sector ferroviario en el campo de la energía ha sido muy importante, tanto a nivel de desarrollo de proyectos tecnológicos como de aplicación de soluciones efectivas en materia de eficiencia energética. Con relación a los proyectos, se han desarrollado (y continúan desarrollándose) iniciativas tecnológicas de gran trascendencia e impacto para el sector. En concreto, desde noviembre de 2016 se han contabilizado más de quince proyectos en los que han participado distintos agentes nacionales, evidenciando la amplia actividad del sector en este campo.

Respecto a las iniciativas y soluciones en materia de eficiencia energética, puede afirmarse que todos los administradores y operadores ferroviarios disponen de nuevos planes (o actualizaciones de otros anteriores) de eficiencia energética a nivel de sus compañías. En el caso particular del consumo de energía eléctrica, teniendo en cuenta que más del 70% de este consumo se destina a la energía eléctrica de tracción, la implantación de medidas de ahorro en este ámbito ha sido, y continúa siendo, muy numerosas.

SERVICIOS FERROVIARIOS CON CC

Centrando el análisis al caso de la infraestructura eléctrica de CC, que es la que principalmente se emplea en el ferrocarril español, destaca la penetración de la tecnología de recuperadores de energía en las subestaciones eléctricas de tracción. Compañías como ADIF, Metro de Madrid o TMB continúan la instalación de esta tecnología en sus redes.

Por otra parte y de forma particular, algunos operadores han continuado evolucionando e implantando en sus sistemas ATO módulos de optimización energética. Así por ejemplo FGC implantará en 2023 un sistema ATO con un módulo de conducción eficiente.

En general, el fomento de la cultura de la eficiencia energética dentro del seno del personal de conducción a través de la formación de los maquinistas y la elaboración y distribución de manuales de buenas prácticas para llevar a cabo una conducción eficiente, son otras acciones potenciadas en este sentido.

Un aspecto también a reseñar aquí se refiere al uso progresivo de la tracción eléctrica por parte de los operadores de mercancías. Cabe destacar también aquí la iniciativa de FGC, que comenzará a cambiar, a partir de mediados de 2022, sus locomotoras diésel para el transporte de mercancías por locomotoras duales de tracción eléctrica y diésel, con ahorros del 70% en emisiones. Adicionalmente, algunos operadores privados han comenzado a introducir locomotoras eléctricas de última generación.

SERVICIOS FERROVIARIOS CON CA

Un ámbito de análisis independiente sería el de los servicios ferroviarios que emplean sistemas de CA, como por ejemplo los de alta velocidad, lo que hace en sí que sean servicios muy eficientes desde un punto de vista energético (empleo de mayor tensión eléctrica y regeneración eléctrica *natural* sin necesidad de precisar recuperadores de energía en las subestaciones de tracción). No obstante son responsables del 45% del consumo eléctrico total de tracción de la RFIG por lo que en estos cinco años también se ha continuado desarrollando importantes iniciativas orientadas a la reducción de dicho consumo. Entre otros, ADIF Alta Velocidad sigue apostando por el empleo del sistema de alimentación a catenaria *doble*, del tipo 2 x 25 kV, más eficiente que el sistema monofásico simple 1 x 25 kV. Por otra parte, este tipo de redes serán las primeras en experimentar los beneficios asociados a la transformación del sistema eléctrico *convencional* a uno *inteligente* (durante 2022 se prevé iniciar una prueba piloto en un trayecto específico de esta red de CA).

Del mismo modo los operadores también están desarrollando diferentes líneas de trabajo: Renfe continua implantando equipos de conducción eficiente automática, así como el desarrollo de aplicaciones asociadas, en las EMU S102, S112, S130 y S730.

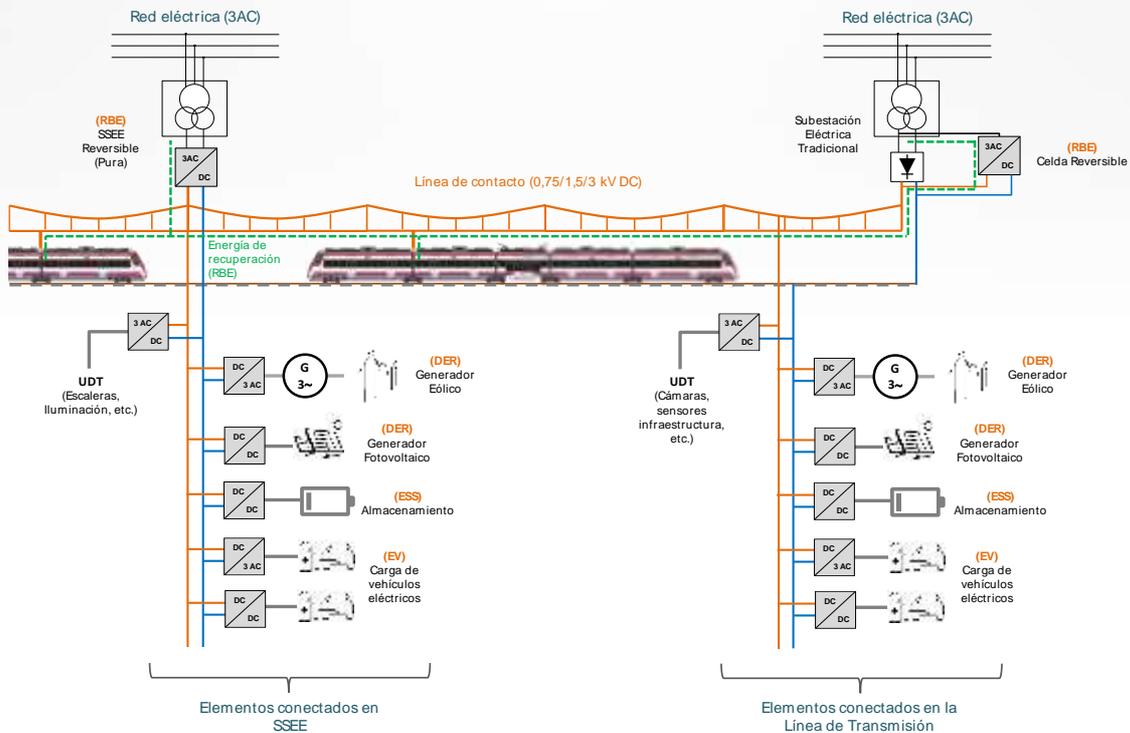
PROYECTOS TECNOLÓGICOS: ORIENTACIÓN AL ÁMBITO DE LAS NUEVAS REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES

Desde 2016 los proyectos de I+D+i desarrollados en el ámbito de los sistemas de electrificación han sido muy diversos, destacando especialmente los proyectos europeos consorciales In2Rail, In2Stempo y E-LOBSTER, relacionados todos ellos con la implementación de nuevos activos *inteligentes* en la red eléctrica ferroviaria e/o integración en redes también *inteligentes*. Estos proyectos han continuado asentando las bases para el desarrollo de redes eléctricas ferroviarias más eficientes, lo que demuestra el empeño del sector por continuar innovando y mejorando la infraestructura eléctrica ferroviaria.

Hay que tener en cuenta que entre las principales funciones a desarrollar por este tipo de redes se encuentran las siguientes:

- Mejorar y flexibilizar la gestión de los flujos de energía eléctrica en el sistema ferroviario.
- Mejorar la explotación y mantenimiento de los activos de la infraestructura eléctrica, maximizando las posibilidades de gestión remota y minimizando el coste global de operación y mantenimiento.
- Obtener una respuesta más autónoma y dinámica de la red. Con la gestión de la información se puede actuar sobre los dispositivos y mejorar la respuesta y protección de la infraestructura ante fallos o la coordinación de recursos energéticos distribuidos para evitar fallos de suministro eléctrico, aumentando la seguridad y fiabilidad del sistema eléctrico ferroviario.
- Disponer de un mejor conocimiento sobre la gran variedad de puntos de consumo en una red tan compleja como es la red de tracción ferroviaria.
- Controlar los flujos de potencia considerando la posible introducción de generadores de energía eléctrica deslocalizados basados en fuentes renovables.

- Ayudar a la toma de decisiones futuras sobre planteamientos estratégicos relacionados con la energía eléctrica, como son la posible evolución hacia un modelo de autoconsumo en determinados emplazamientos y la redefinición del modelo de alimentación eléctrica (pudiendo contemplarse sistemas de almacenamiento de energía, etc.).



Representación general de una red eléctrica ferroviaria inteligente.

OTROS VECTORES ENERGÉTICOS

Puede afirmarse que la electricidad continuará siendo el vector energético principal del transporte ferroviario español. Ahora bien, ¿cuáles van a ser los otros vectores energéticos en el futuro? A la vista de las distintas iniciativas puestas en marcha por los operadores y la industria, estos vectores serían, principalmente, el Hidrógeno, el GNL y los combustibles de huella cero.

En efecto, como se ha indicado anteriormente, en España alrededor del 20% del tráfico ferroviario actual continúa desarrollándose con tracción diésel por lo que la introducción de nuevos vectores que descarbonicen estos tráficos es un proceso ya comenzado.

En el caso del *Hidrógeno*, las iniciativas puestas en marcha desde 2020 son diversas siendo el objetivo principal el desarrollo de una nueva generación de vehículos con este tipo de tracción. Una referencia es el proyecto europeo consorcial FCH2RAIL en el que se desarrollará una nueva modalidad de tren híbrido eléctrico/hidrógeno partiendo de una EMU 463 perteneciente a Renfe.

En realidad los principales fabricantes españoles de material rodante ya están desarrollando proyectos tecnológicos en esta materia.

El *GNL* también ha sido objeto de diferentes proyectos en los últimos años, destacando la transformación de una EMU 2600, también perteneciente a Renfe, en el proyecto RaiLNG.

Precisamente Renfe tiene en marcha desde 2019 un Plan de Renovación de Flota con el objetivo principal de reducir la edad media de su parque ferroviario. En concreto, los servicios de Cercanías y Media Distancia -que acumulan más del 80% del servicio público de la empresa- tienen material ferroviario con más de 30 años de antigüedad, siendo esencial actuar. Este rejuvenecimiento del material rodante viene ligado, entre otros aspectos, a disponer de trenes con mejores características en cuanto a consumo energético e impacto ambiental. En concreto se apostará por trenes con tecnología dual (eléctrica y de hidrógeno y baterías) para los servicios de Cercanías y Media Distancia.

GENERACIÓN CON ENERGÍAS RENOVABLES. AUTOCONSUMO

En España existe actualmente una apuesta clara por el impulso de la generación renovable para permitir el cumplimiento de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, la integración de energías renovables sobre el consumo energético del sector del transporte es igualmente una prioridad.

Diferentes administradores y operadores ferroviarios están realizando estudios y análisis que permitan planificar e introducir la generación distribuida basada en energía solar fotovoltaica, autoconsumiendo posteriormente a partir de ella. Este enfoque, que normalmente se ha impulsado en el ámbito de la edificación (por ejemplo estaciones de viajeros o zonas auxiliares como aparcamientos), se está también orientando al propio consumo de los trenes.

III. POLÍTICA Y MARCO NORMATIVO

Tras cinco años transcurridos desde que se editó la primera versión del documento sobre *Gestión energética sostenible e inteligente en el ámbito ferroviario*, el cuerpo legislativo y normativo ha crecido en términos generales, principalmente con relación al uso de combustibles alternativos al gasóleo.

Como se ha visto anteriormente, el sector ferroviario español, aunque sí ha hecho sus deberes en materia de electrificación, debe continuar avanzando en el ámbito de la descarbonización de líneas y material móvil con dependencia del gasóleo.

En el ámbito de la electrificación, a nivel nacional, el *Real Decreto 1011/2009*² continúa siendo aplicado por el sector como principal incentivo para el vertido a la red externa de la

² Real Decreto 1011/2009, de 19 de junio, por el que se regula la Oficina de Cambios de Suministrador (y según su Disposición adicional duodécima relativa a Vertidos a la red de energía eléctrica para consumidores que implanten sistemas de ahorro y eficiencia).

energía generada en el frenado regenerativo de los trenes. Respecto al ámbito de las redes eléctricas inteligentes, desde 2016 se constata que apenas se ha avanzado en términos legales y normativos. Incluso debe tenerse en cuenta que las redes eléctricas no ferroviarias, que son las más avanzadas en esta materia, todavía no disponen de un marco regulatorio y de gobernanza efectivo con el objetivo de incentivar un nuevo diseño del mercado energético y una mayor interacción con los consumidores finales. En términos ferroviarios sí será fundamental que los nuevos proyectos tecnológicos que se realicen ayuden a desarrollar este marco en el ferrocarril.

NUEVOS VECTORES ENERGÉTICOS

En relación a las principales acciones políticas y normativas durante estos años, a continuación se destacan algunas de ellas por orden cronológico, muy alineadas con el uso de nuevos vectores energéticos:

- En diciembre de 2019 fue aprobado el denominado *Pacto Verde Europeo*, fijando objetivos ambiciosos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, de mejora de la eficiencia energética y de penetración de las energías renovables en 2030.
- En julio de 2020 se publicó la *Estrategia Europea del Hidrógeno* con el objetivo de dibujar una hoja de ruta para el despliegue del hidrógeno a nivel de la UE. A continuación, en octubre de 2020, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico lanzó la *Hoja de Ruta del Hidrógeno*, situando al hidrógeno renovable como parte de la solución para lograr la neutralidad climática en 2050 y desarrollar cadenas de valor industriales innovadoras en España. Esta Hoja prevé que en 2030 existan trenes traccionados con hidrógeno en al menos dos líneas comerciales no electrificadas.
- En septiembre de 2020 el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana aprobó la *Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030* para dar respuesta a los nuevos retos que se dan en la movilidad y el transporte para poder contribuir a alcanzar la descarbonización de la economía. Cabe destacar que en dicha estrategia ya se indica expresamente la necesidad de emplear Hidrógeno y GNL en el ferrocarril.
- En noviembre de 2020, a propuesta del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, se aprueba en España la *Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050 (ELP 2050)*, que marca la senda para alcanzar la neutralidad climática en 2050. Establece que la descarbonización del sector transporte vendrá de la mano de la intensificación de las medidas de eficiencia energética, junto con la sustitución de los combustibles fósiles por otros productos de bajas o nulas emisiones netas de carbono. En 2030, como resultado de las medidas previstas en el *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima* (como el cambio en los modelos de movilidad y el incremento de la electrificación) se prevé alcanzar una cuota del 28% de energía renovable en el transporte, así como una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero del 30% entre 2021 y 2030. En el camino hacia la neutralidad climática de este sector a partir del año 2030 se ha de avanzar en medidas de eficiencia energética, electrificación del sector, promoción de los combustibles líquidos y gases renovables, digitalización y planificación urbanística integrada.

- En julio de 2021 se presenta la propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a la implantación de infraestructuras para los combustibles alternativos y por el que se deroga la Directiva 2014/94/UE del Parlamento Europeo y del Consejo. Destacar al respecto los ambiciosos objetivos marcados para 2030 y para 2050 en materia de puntos de recarga eléctrica y de repostaje de hidrógeno. La aprobación de dicho Reglamento supondrá la inmediata entrada en vigor, sin necesidad de trasposición nacional.

AUTOCONSUMO

En abril de 2019 el Gobierno aprobó el Real Decreto 244/2019, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica en España. Esta norma completa el marco regulatorio sobre esta cuestión, impulsado por el Real Decreto-ley 15/2018, por el que se derogó el denominado impuesto al sol, y aporta certidumbre y seguridad a los usuarios.

Entre las principales novedades regulatorias incluidas en el Real Decreto 244/2019 está que se realiza una nueva definición de autoconsumo, recogiendo que se entenderá como tal el consumo por parte de uno o varios consumidores de energía eléctrica proveniente de instalaciones de generación próximas a las de consumo y asociadas a las mismas. Se establece que la energía autoconsumida de origen renovable, cogeneración o residuos, estará exenta de todo tipo de cargos y peajes.

Se definen dos modalidades de autoconsumo: *autoconsumo sin excedentes*, que en ningún momento puede realizar vertidos de energía a la red. Se exime a estas instalaciones de la necesidad de obtención de los permisos de acceso y conexión de las instalaciones de generación, y a registrar la instalación con un procedimiento administrativo muy simplificado.

La otra modalidad es el *autoconsumo con excedentes*, en el que sí se pueden realizar vertidos a las redes de distribución y transporte (generación con vertido a red), y que por tanto requerirían tramitar los permisos de acceso y conexión.

IV. CONSIDERACIONES TÉCNICAS GENERALES

Uno de los objetivos del presente documento se refiere a la identificación de *retos* cuya adopción permita a los administradores y operadores ferroviarios realizar una mejor gestión energética en sus distintos ámbitos. Precisamente, y según se hizo en el documento original, los distintos retos serán agrupados atendiendo a su ámbito de aplicación: *Infraestructura, Material Móvil y Explotación y Operación*.

De manera específica se ha considerado que la aplicación de los distintos retos podrá aportar mejoras en una o varias direcciones:



Ahorro de energía eléctrica



Descarbonización



Eficiencia en la operación

Por su importancia estratégica para los usuarios finales, se indica expresamente si estos retos pueden llevar asociadas medidas de *inversión económica* directas y en qué términos aproximados sería su intensidad:



Inversión económica nula o baja (menor a 10 k€)



Inversión económica media (entre 10 y 500 k€)



Inversión económica alta (mayor a 500 k€)

Los retos también serán clasificados de acuerdo a las implicaciones técnicas asociadas a su implantación. En este sentido se tendrán retos de *naturaleza pasiva*, esto es, aquellos que no se basan en soluciones complejas a nivel de equipamiento (por ejemplo un diseño eficiente de la red eléctrica basado en las *buenas prácticas*). Los retos de *naturaleza activa* serán aquellos cuya aplicación sí conlleva el empleo de equipos técnicos que cumplen una función predeterminada en base a una lógica de control (por ejemplo la operación de un Convertidor Electrónico de Potencia para posibilitar la inyección de energía de frenado en la red). De manera concreta se diferencia entre equipos técnicos de *naturaleza puramente eléctrica* y equipos de *naturaleza digital*:



Naturaleza pasiva (no implica uso de nuevo equipamiento)



Naturaleza activa (nuevo equipamiento eléctrico)



Naturaleza activa (nuevo equipamiento digital)

Por último debe considerarse que los retos no son *estancos*, teniendo relación muchos de ellos.

V. INFRAESTRUCTURA

Tal y como se afirmaba en 2016, la infraestructura ferroviaria tiene un papel primordial en la gestión energética del sistema ferroviario en su conjunto y una gran parte de los ahorros de energía previstos deben provenir de las medidas aquí adoptadas.

Los retos identificados son recogidos en la siguiente tabla.

Reto	Descripción	Identificación en 2016	Avance desde 2016 (*)
R.1	Diseñar de manera eficiente la red eléctrica ferroviaria	Sí	Sí
R.2	Diseñar el trazado ferroviario considerando aspectos del consumo energético	Sí	No
R.3	Potenciar el aprovechamiento activo de la energía eléctrica generada en el frenado de los trenes (en sistemas de CC)	Sí	Sí
R.4	Introducir el almacenamiento (en tierra) de energía eléctrica externa	No	-
R.5	Optimizar la conexión del sistema eléctrico ferroviario de CA con las redes externas	No	-
R.6	Potenciar el mantenimiento predictivo de los activos de la red eléctrica ferroviaria	No	-
R.7	Introducir la red eléctrica ferroviaria inteligente	Sí	Sí
R.8	Potenciar la tecnología de enlaces superconductores	No	-
R.9	Optimizar la alimentación eléctrica de instalaciones auxiliares	Sí	No
R.10	Potenciar el desarrollo de electrónica de potencia (en tierra) eficiente	No	-

Tabla 1. Resumen de los retos identificados en el área de Infraestructura.

(*): A juicio general de los organismos participantes en el documento.

R.1. Diseñar de manera eficiente la red eléctrica ferroviaria		
Inversión: 	Naturaleza: 	Mejora: 
Relación con: R.18		
<p>Las líneas de trabajo en este ámbito continúan siendo diversas y se enfocan principalmente al diseño eficiente de la infraestructura eléctrica con un enfoque de <i>buenas prácticas</i> y no potenciando la adquisición de tecnología específica. Entre otras se citan las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Emplear secciones de refuerzo adecuadas con el objetivo de posibilitar una distribución de corriente de tracción eficiente. – Proyectar puestas en paralelo entre Líneas de Transmisión. – Analizar en proyecto la energía reactiva de las instalaciones. – Adoptar equipos técnicos eficientes. – Posicionar Zonas Neutras de separación de fases eléctricas (en sistemas de CA) en zonas llanas. – En sintonía con el ámbito de Explotación y Operación (R.18), diseñar una topología de red que permita un aprovechamiento óptimo de la energía regenerada en función de diferentes escenarios de explotación (principalmente en sistemas de CC). – Emplear tensiones de suministro los más elevadas posibles, mediante receptoras conectadas a la red de transporte y redes internas en Media Tensión, garantizando una mejor calidad del suministro, una mejor tarifa eléctrica y una mayor capacidad para aprovechar toda la energía regenerada por los recuperadores de tracción en sistemas de CC. <p>En principio estas líneas de trabajo no deberían suponer un planteamiento complejo a los distintos usuarios. Por el contrario sí cabe destacar dos líneas de actuación que, siendo propias de los proyectos de ingeniería correspondientes, sí tendrían un gran impacto sobre la funcionalidad y características de la red. En concreto se refiere a incrementar la tensión eléctrica nominal de la Línea de Transmisión y a evolucionar a sistemas de tracción de corriente alterna monofásica en detrimento de la corriente continua (referido principalmente a la RFIG). En realidad esta última ya se está implantando en los últimos años, no sólo en las nuevas infraestructuras construidas, sino también en las infraestructuras ya existentes que son electrificadas. Las ventajas de uso de esta corriente son mayores que su principal desventaja (generación de perturbaciones sobre la red externa y sobre instalaciones ferroviarias cercanas).</p>		

R.2. Diseñar el trazado ferroviario considerando aspectos del consumo energético

Inversión:



Naturaleza:



Mejora:



Un diseño eficiente del trazado, en términos de consumo de energía, se traduce principalmente en un perfil de velocidades homogéneo.

Así la homogeneidad del perfil de velocidades reduce el uso de freno para decelerar en la línea, limitándose mayoritariamente a las paradas. En muchos casos supone que la velocidad es menor a las velocidades máximas posibles y puede suponer una reducción sensible de la velocidad media del viaje.

Para conseguir este perfil de velocidades homogéneo con una reducción mínima de la velocidad media, se recomienda:

- Evitar limitaciones puntuales de velocidad.
- Elevación de rasante en estaciones, para minimizar el frenado necesario al llegar a ellas.
- Rasante horizontal en estaciones para reducir la potencia de arranque.
- Pendientes armonizadas con la velocidad que permiten los tramos.

R.3. Potenciar el aprovechamiento activo de la energía eléctrica generada en el frenado de los trenes (en sistemas de CC)

Inversión:



Naturaleza:



Mejora:



Relación con:

R.7 R.8 R.10

El aprovechamiento activo de la energía regenerada en el frenado en líneas de corriente continua seguirá representando un aspecto estratégico de las compañías ferroviarias, tanto en lo relativo a la instalación de convertidores electrónicos de potencia para inyectar esta energía excedentaria a la red (celdas reversibles) como a la instalación de sistemas de almacenamiento en tierra.

La tecnología comienza a ser estándar si bien es preciso continuar optimizándola a medida que se dispone de un mayor conocimiento en la fase de operación.

El Real Decreto 1011/2009 sigue representando una herramienta fundamental para la implantación de celdas reversibles al representar un incentivo económico directo para los usuarios. Cabe destacar que la experiencia de operación ha permitido confirmar que el ahorro que se produce es muy importante, con valores que incluso pueden sobrepasar el 50% de la energía total consumida por la subestación, amortizando en pocos años la inversión.

Por el contrario la implantación de sistemas de almacenamiento en tierra apenas se ha producido aunque se prevé que la tendencia cambie a raíz de la introducción paulatina de las nuevas redes eléctricas inteligentes. Actualmente debe tenerse en cuenta que esta solución es más cara que el empleo de celdas reversibles aunque también dispone de otras ventajas técnicas asociadas a la mejora de los flujos de energía en la red como son:

- La minimización de los problemas derivados por subtensiones.
- La continuidad del suministro de energía eléctrica en caso tener una falta desde la subestación (por ejemplo, para la salida de un tren de un túnel o la llegada a una estación próxima).
- La limitación de las perturbaciones provenientes de la instalación.
- La mejora de la calidad de distribución de energía.

En todo caso es necesario actualizar, a nivel del sector, las características técnicas y económicas de las distintas tecnologías de almacenamiento, identificando cuáles serían las más eficientes para las necesidades actuales de las compañías ferroviarias. Estas tecnologías sí deben orientarse en todos los casos a la mejora de la capacidad energética así como al ratio de coste por unidad de energía por cada ciclo de carga/descarga.

La experiencia de uso en tierra, aunque baja, identifica que el almacenamiento electroquímico es el más interesante en este momento en comparación con el

almacenamiento puramente mecánico. Así las baterías de ion de litio están siendo mejoradas, desarrollándose baterías que emplean también titanio. Por otra parte existen trabajos en curso para optimizar las baterías de flujo redox.

Cabe destacar que uno de los sistemas de almacenamiento de energía que se postula en el futuro es el uso del hidrógeno verde. En la etapa de producción se obtendría a partir de electricidad renovable, preferiblemente energía solar y eólica, mediante electrólisis, y por tanto puede ser otro de los elementos necesarios de almacenamiento para mejorar la gestión de la red eléctrica.

R.4. Introducir el almacenamiento (en tierra) de energía eléctrica externa

Inversión:



Naturaleza:



Mejora:



Relación con:

R.7 R.9 R.10 R.20

Se refiere al almacenamiento de energía eléctrica generada mediante fuentes de energía renovable externas (el reto R.2 se refiere al almacenamiento exclusivo de la energía eléctrica generada en el frenado). Es necesario introducir el uso de fuentes de energía renovable para la alimentación eléctrica, no sólo de instalaciones auxiliares o edificios ferroviarios, sino también de los trenes.

En todo caso también se podría acumular energía eléctrica procedente de otras redes en periodos tarifarios más baratos para que puedan ser utilizados como fuentes de suministro auxiliares o de emergencia, o como apoyo en momentos de máxima demanda de energía.

Este reto cobra especial importancia para el desarrollo de los retos relacionado con las redes inteligentes (R.6) y con el autoconsumo de los propios gestores y operadores ferroviarios (R.20).

R.5. Optimizar la conexión del sistema eléctrico ferroviario de CA con las redes externas

Inversión:



Naturaleza:



Mejora:



Relación con:

R.7 R.10

La expansión de los ferrocarriles de corriente alterna monofásica con frecuencia industrial está potenciando el desarrollo de nuevos esquemas de conexión que permitan compatibilizar su uso con las redes eléctricas de alimentación, produciendo una mínima afeción sobre ellas.

Tradicionalmente el desarrollo de los grandes ejes de alta velocidad ha llevado asociada la construcción de las redes de alimentación necesarias (normalmente *de transporte*). Pero podría ocurrir que en ocasiones no sea posible desplegar esta infraestructura, debiendo utilizar redes con menores prestaciones técnicas que se pueden ver más afectadas al conectarse con el ferrocarril. Debe tenerse en cuenta que, en todo caso, diferentes corredores convencionales de la RFIG migrarán en un futuro a sistemas de corriente alterna, pudiendo en su caso aprovechar las redes externas ya existentes (*de distribución* en estos casos). Este planteamiento debe considerarse como una medida de gestión energética sostenible.

En estos casos el empleo FACTS en las subestaciones eléctricas de corriente alterna podría ser un requerimiento necesario, migrando a nuevos equipos de tracción que permitirían controlar los desequilibrios sobre la red externa así como el valor de voltaje sobre la Línea de Transmisión, todo ello considerando el empleo de una red eléctrica externa con baja potencia de cortocircuito. Del mismo modo se prevé que pueda reducirse el consumo de energía tal y como se demostró en el proyecto europeo de I+D+i In2Rail.

R.6. Potenciar el mantenimiento predictivo de los activos de la red eléctrica ferroviaria

Inversión:



Naturaleza:



Mejora:



Relación con:

R.7

El mantenimiento que normalmente se aplica en la infraestructura ferroviaria es un mantenimiento preventivo periódico. Este mantenimiento tiene por finalidad adelantarse a la avería reparando o sustituyendo los elementos de una instalación, respetando la vida útil de los mismos, que vendrá definida por el criterio del fabricante. Para ello se realizan seguimientos continuos de los elementos de la instalación a partir de la documentación que proporciona el fabricante. De esta manera se sustituirán las piezas sin esperar a llegar a su fin de vida ni a su avería, realizando este tipo de mantenimiento en horas que no alteren la explotación de la línea ferroviaria.

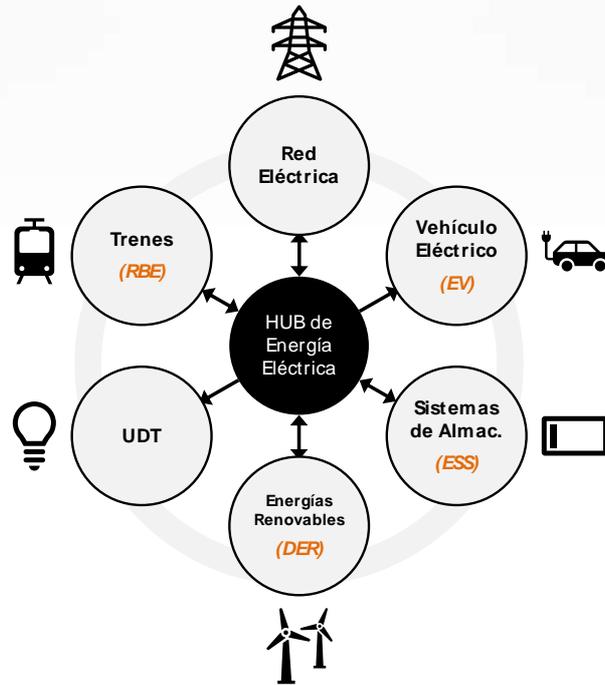
Pero el mejor rendimiento se puede lograr con un mantenimiento predictivo o basado en la condición. Este mantenimiento se fundamenta en el uso de herramientas con el fin de adquirir información del deterioro de los elementos y crear una base de conocimientos que permita inferir riesgos de fallo y desarrollar estrategias para decidir cuándo realizar la intervención o retrasarlo en su caso. Se trata de un proceso monitorizado en el que el objetivo es disponer de la máxima cantidad de datos que ayuden al gestor ferroviario a determinar el momento en el que se producirá una avería y determinar así el momento oportuno para actuar.

La aplicación de este tipo de mantenimiento a los activos eléctricos de la infraestructura podrá redundar en una mejora de la operativa, haciéndola más sostenible.

R.7. Introducir la red eléctrica ferroviaria inteligente		
Inversión: 	Naturaleza: 	Mejora: 
Relación con: R.3 R.4 R.5 R.6 R.10		
<p>Este tipo de redes constituirá el desarrollo que mejor aúna el sistema eléctrico ferroviario y las nuevas técnicas digitales con objeto de implementar una red más eficiente, no solo desde un punto de vista del consumo eléctrico sino también de la operación. En 2016 ya se identificó de manera específica este reto y desde entonces sí se ha avanzado en este desarrollo, en parte gracias a la realización de diversos proyectos como In2Rail, In2Stempo y E-LOBSTER.</p> <p>Esta nueva red eléctrica ferroviaria podría entenderse como una <i>agrupación</i> del resto de tecnologías anteriormente mencionadas (celdas reversibles, sistemas de almacenamiento, fuentes de energía renovable, etcétera), formando <i>nodos</i>. Considerando que podrían añadirse otras más (con objeto de disponer de un mayor número de funcionalidades), en todo caso debe regir una disciplina de control que regule y ejecute las acciones oportunas.</p> <p>El reto es por tanto que la red eléctrica ferroviaria pueda transformarse en los próximos años en un concentrador o <i>HUB energético</i> incorporando <i>nodos de generación distribuidos (DER)</i>, <i>nodos que utilicen de manera eficiente la energía de frenado regenerativo de los trenes (RBE)</i>, <i>nodos de almacenamiento de energía en tierra (ESS)</i> y <i>nodos asociados a infraestructuras de carga para vehículos eléctricos (EV)</i> entre otros (ver esquema inferior).</p> <p>Precisamente lo que algunos administradores ferroviarios han desarrollado hasta la fecha son diferentes iniciativas y/o proyectos a nivel de esos nodos de manera independiente (principalmente proyectos de celdas reversibles, RBE), siendo necesario potenciar nuevos proyectos que los integren a todos en conjunto.</p> <p>El tren debería poder convertirse en un <i>nodo móvil</i> del sistema, pudiendo ser también integrado en el HUB anterior. Precisamente la conectividad del tren con la infraestructura eléctrica es un reto específico a abordar. La gestión avanzada de una flota de trenes está permitiendo conocer el estado actual de cada vehículo, su consumo y sus condiciones de operación reales. Esta información, tratada mediante algoritmos precisos y detallados, permitiría identificar puntos de mejora y definir nuevos criterios de optimización energética.</p> <p>La evolución de las técnicas de simulación actuales permitirá conocer el estado de la infraestructura para una explotación dada, pudiendo ajustar tanto la operación como la configuración de la infraestructura desde una visión de eficiencia energética conjunta. El consumo individual del vehículo puede no ser el óptimo mientras que el conjunto sí represente el óptimo. La sincronización de la tensión de la Línea de Transmisión junto con los horarios de circulación y los instantes de aceleración y frenado del vehículo permitirá la optimización del conjunto.</p>		

La conectividad avanzada permite que la infraestructura conozca y pueda optimizar el consumo esperado del material rodante, mientras que el vehículo puede conocer las necesidades de la infraestructura y actualizar su operación. Los sistemas de asistencia a la conducción habilitarán la predicción de la operación del material móvil, la comunicación tren-infraestructura y la conducción de acuerdo a una optimización global.

Por último debe considerarse que la ciberseguridad es un aspecto clave a tener en cuenta en el desarrollo de estas nuevas redes eléctricas ferroviarias debido a la gran cantidad de información generada, registrada y procesada para la toma de decisiones y actuaciones.



R.8. Potenciar la tecnología de enlaces superconductores		
Inversión: <i>Por analizar</i>	Naturaleza: 	Mejora: 
Relación con los Retos: R.3		
<p>Una tecnología que comienza a implantarse en los sistemas de corriente continua es el uso de cables auxiliares superconductores, existiendo ya experiencias de uso en Japón. Como los cables superconductores poseen una baja resistencia eléctrica, pueden obtenerse considerables ahorros de energía, al tiempo que puede incrementarse la estabilidad del voltaje. Ésta es una ventaja en los sistemas de corriente continua ya que el voltaje se reduce de manera notable a medida que aumenta la distancia con la subestación.</p> <p>Esta solución podría ayudar a mejorar el proceso de regeneración de energía eléctrica en caso de que no existiera un tren consumiendo en las inmediaciones de otro que está frenando. En realidad sería posible incrementar la energía recuperada con el frenado regenerativo, incluyendo la energía devuelta a la red externa en subestaciones de tracción equipadas con celdas reversibles.</p>		

R.9. Optimizar la alimentación eléctrica de instalaciones auxiliares		
Inversión: 	Naturaleza: 	Mejora: 
Relación con los Retos: R.4		
<p>Estas instalaciones auxiliares, de muy diversa naturaleza, se circunscriben al caso de ubicaciones geográficas aisladas donde no existe alimentación eléctrica directa a redes externas o en donde sí existiendo, no es continua en el tiempo (en este caso se suele conmutar a otro tipo de sistemas de generación basados en grupos electrógenos convencionales).</p> <p>El objetivo es migrar estratégicamente a sistemas de generación sostenibles basados en otros posibles vectores energéticos como pilas de combustible de Hidrógeno o baterías convencionales. Cabe destacar que el empleo de combustibles de huella cero (producidos con agua y CO₂) en los grupos electrógenos convencionales sería igualmente una opción a explorar.</p> <p>Por otra parte, en este reto se identifica otro ámbito referido al empleo del concepto de Energy Harvesting o extracción de Energía Ambiente, sobre todo en el caso de consumos eléctricos reducidos (caso por ejemplo de nuevos sensores distribuidos por la vía). Así, debe analizarse si el aprovechamiento del ruido y de la vibración producidos por el tren, es una posible opción como como fuente de energía para este tipo de dispositivos.</p> <p>Recientemente se han desarrollado nanogeneradores triboeléctricos que pueden ser excitados con sonido y vibraciones de baja frecuencia. Deberá en todo caso analizarse la viabilidad económica de estos nuevos sistemas teniendo en cuenta su mantenimiento posterior.</p> <p>También cabe reseñar la existencia de proyectos piloto basados en la recuperación de energía eólica en túnel a través de aerogeneradores o la utilización de energía geotérmica para la climatización de subestaciones de tracción mediante al agua freática captada en los pozos de bombas (soluciones con posible interés en el caso de las explotaciones subterráneas).</p>		

R.10. Potenciar el desarrollo de electrónica de potencia (en tierra) eficiente

Inversión:
Por analizar

Naturaleza:



Mejora:



Relación con los Retos:

R.3 R.4 R.5 R.7

Mientras que la electrónica de potencia ha sido tradicionalmente empleada en el material rodante, su uso en la infraestructura de tierra ha sido más reducida. La introducción de nuevos planteamientos operativos y conexiones eléctricas (a los que se refieren algunos de los retos anteriormente introducidos) ha cambiado esta tendencia y el empleo de estos nuevos equipos se hace imprescindible desde hace unos años.

A diferencia de lo que ocurre con los equipos embarcados, en el ámbito de la infraestructura de tierra los requerimientos asociados a aspectos mecánicos (espacio y vibraciones entre otros), son menos importantes aunque sí existen otros nuevos requerimientos actualmente no del todo explorados. Un aspecto muy importante se refiere al cumplimiento de todos los estándares asociados a la generación de perturbaciones en el sistema ferroviario, principalmente sobre las instalaciones de Control, Mando y Señalización, pues será práctica habitual poder conectar estos equipos en ubicaciones diferentes a las subestaciones eléctricas de tracción, siendo precisa la conexión al carril de rodadura.

Las técnicas de modelización (gemelo digital) en redes de Media Tensión ayudarán a garantizar una buena calidad del servicio eléctrico cuando, cada vez más, se están incorporando nuevos sistemas basados en generación y electrónica de potencia.

Por otra parte los semiconductores se han basado a lo largo de la historia en el silicio como elemento de base. Desde hace unos años el carburo de silicio comienza a sustituir al silicio, especialmente para las tensiones de bloqueo superiores a 500 V. Los componentes de carburo de silicio tienen pérdidas mucho menores que los semiconductores de potencia basados en silicio. Además dominan mayores tensiones de bloqueo y mayores temperaturas de servicio. De alguna manera, el uso de este nuevo material ha permitido ir encontrando el componente ideal que permita aunar en un mismo elemento el bloqueo de tensiones elevadas (en estado abierto), corrientes elevadas (en estado de conducción) y bajas pérdidas de potencia.

VI. MATERIAL MÓVIL

El material móvil con tracción eléctrica está fuertemente optimizado, según ya se afirmaba en el documento de 2016. En todo caso la mejora en este ámbito vendrá principalmente representada por los nuevos vectores energéticos identificados.

Los retos identificados son recogidos en la siguiente tabla.

Reto	Descripción	Identificación en 2016	Avance desde 2016 (*)
R.11	Potenciar el almacenamiento de energía eléctrica a bordo	Sí	Sí
R.12	Potenciar la tracción con hidrógeno en pila de combustible	No	-
R.13	Potenciar la tracción con GNL	Sí	Sí
R.14	Potenciar la tracción con combustibles de huella cero	No	-
R.15	Implantar sistemas de medida embarcada	Sí	Sí
R.16	Potenciar el desarrollo de electrónica de potencia (a bordo) eficiente	No	-

Tabla 2. Resumen de los retos identificados en el área de Material Móvil.

(*): A juicio general de los organismos participantes en el documento.

R.11. Potenciar el almacenamiento de energía eléctrica a bordo

Inversión:



Naturaleza:



Mejora:



Relación con los Retos:

R.16

El almacenamiento de energía a bordo del vehículo continúa postulándose como una de las principales mejoras en la gestión energética del sistema ferroviario. Al igual que la aplicación *en tierra*, las tecnologías son numerosas y continúan desarrollándose en el momento actual, siendo el almacenamiento electroquímico el más usado y el que mejor se posiciona en los próximos años. Se persigue optimizar la duración de la carga y el número de ciclos de vida de la batería. Las baterías de litio y titanio son una mejora muy importante respecto a las baterías de ion litio.

Mientras que en el caso de la infraestructura en tierra el almacenamiento tiene un claro efecto positivo en la estabilidad eléctrica del sistema, en el caso del material rodante puede aportar mejoras directas en la seguridad, por ejemplo, para mover el tren en caso de una falta de suministro. Esta funcionalidad ya ha sido empleada principalmente en material rodante urbano, en algunos casos también para la transición del vehículo por zonas que no disponen de Línea de Transmisión.

De especial interés es reseñar la solución implantada en la EMU N700S de los ferrocarriles japoneses (JR Central), en servicio desde verano de 2020. Este tren es el primer tren de alta velocidad equipado con esta tecnología, la cual permite autopropulsarse en caso de interrumpirse la corriente de la Línea de Transmisión. El sistema se equipa en cuatro de los dieciséis coches del tren y se basa en baterías de ion litio.

Por otra parte también debe destacarse que entre las iniciativas de EU-Rail JU se encuentra el desarrollo de una nueva generación de vehículos alimentados específicamente por baterías (BEMUS) que, en puntos concretos del recorrido, serían cargados al igual que los vehículos eléctricos de carretera.

R.12. Potenciar la tracción con hidrógeno en pila de combustible

Inversión:



Naturaleza:



Mejora:



Relación con los Retos:

R.16

El empleo de hidrógeno como vector energético en las nuevas tracciones ferroviarias puede ayudar a cumplir los objetivos medioambientales en aquellas líneas en la que la electrificación no es una alternativa económicamente viable. Aunque es una tecnología conocida desde hace varias décadas, su aplicación comercial en el ferrocarril puede considerarse todavía inmadura o incipiente desde un punto de vista tecnológico, pues no existe excesiva experiencia de uso. No puede obviarse que los grandes suministradores industriales están apostando fuertemente por esta tecnología ya que su uso está fuertemente respaldado por las políticas y ayudas económicas de la UE.

La utilización de hidrógeno tiene grandes ventajas a su favor. Por una parte el vehículo estaría libre de emisiones, tanto en el proceso de generación si se obtiene mediante fuentes de energía renovables (Hidrogeno verde) como en el proceso de combustión. Por otro lado, permite cubrir autonomías superiores a 100 kilómetros, que son los límites actuales de las baterías de recarga. Otra ventaja importante es la reducción del ruido emitido por el vehículo, ventaja importante tanto para usuarios como para los habitantes de áreas cercanas al trazado ferroviario.

Sin embargo el uso de hidrógeno presenta varias desventajas en el momento actual. Entre ellas se encuentra la falta de seguridad en el suministro entendiendo ésta como la disponibilidad de recursos energéticos y la flexibilidad de la cadena de suministro para atender la demanda esperada (tanto a nivel de cantidad como de calidad). La seguridad de uso también puede considerarse actualmente como una cierta desventaja. Esta seguridad debe considerarse como aquella que gestiona los riesgos asociados a la manipulación del combustible en el transporte, el repostaje y el uso del mismo. En este sentido es necesario llevar a cabo mayores análisis técnicos relacionados con el empleo de este material rodante en zonas confinadas como túneles y estaciones subterráneas.

El almacenamiento del hidrógeno a bordo del tren puede presentarse como gas a presión, en forma líquida o almacenado a través de otros líquidos orgánicos. Mientras que en el sector aéreo sí se han realizado importantes análisis respecto al empleo de hidrógeno almacenado (se recomienda el uso de hidrógeno líquido debido a la reducción del volumen necesario y también a la reducción del peso si se compara con el almacenamiento en forma gaseosa), en el ámbito ferroviario se está optando por gases a presión de 350 bares, ya que el tratamiento de hidrógeno líquido requiere la criogenización a -257°C con el coste y dificultades técnicas que supone. Es preciso continuar realizando análisis y demostradores que permitan ampliar la experiencia y conocimiento en las distintas opciones.

El empleo de otras moléculas portadoras de hidrógeno para producirlo a bordo - permitiendo disponer de elevadas densidades energéticas que alimenten las pilas de combustible- está demostrando que el bioetanol y el amoniaco renovable (licuado a

presión) pueden ser una gran alternativa. Ambos compuestos son combustibles líquidos y por tanto con elevada densidad energética.

No puede dejarse de citar aquí que el uso del hidrógeno en el ferrocarril está fuertemente respaldado por la UE, siendo obligatorio su empleo en los próximos años en los distintos países. La mayoría de los países de la Unión Europea han lanzado sus proyectos prototipos, test de homologación o proyectos comerciales de utilización de hidrógeno con pila de combustible en vehículos de pasajeros o de maniobras (en menor medida locomotoras de línea).

R.13. Potenciar la tracción con GNL

Inversión:



Naturaleza:



Mejora:



Relación con los Retos:

R.16

No debe descartarse la potenciación de otros vectores energéticos como el GNL. Este combustible ya ha sido objeto de estudio en España en diferentes proyectos de investigación sobre material rodante diésel. Los resultados han sido muy satisfactorios.

Debe considerarse que el GNL tiene grandes ventajas de uso respecto al resto de combustibles alternativos. En este sentido, aunque las emisiones no son nulas como sí ocurre en el caso del empleo de hidrógeno, su madurez tecnológica, su seguridad de suministro y su seguridad de uso son mayores si se comparan con aquel.

Cabe también destacar que, en términos económicos, el uso de GNL como nuevo vector energético para la tracción ferroviaria, es también más ventajoso. Así, la inversión asociada tanto a la cadena de suministro y repostaje como a la adecuación de la cadena de tracción es menor en todos los casos. Igualmente el coste de la materia prima es también menor.

Por último debe considerarse que la capacidad de adaptación al GNL, de una manera competitiva, de vehículos ya existentes en un operador determinado, es mayor que en el caso de emplear hidrógeno.

R.14. Potenciar la tracción con combustibles de huella cero		
Inversión: 	Naturaleza: 	Mejora: 
Relación con los Retos: R.16		
También debe analizarse el empleo de combustibles de huella cero producidos con agua y CO ₂ como únicas materias primas, que pueden utilizarse en cualquier vehículo actual sin necesidad de cambiar infraestructuras.		

R.15. Implantar sistemas de medida embarcada		
Inversión: 	Naturaleza: 	Mejora: 
Relación con los Retos:		
<p>Un reto que debe continuar aplicándose se refiere al empleo de equipos de medida embarcada que permitan controlar los consumos de tracción de los vehículos, siempre como acción previa a la gestión energética de esos consumos (el sistema se complementaría con el envío de la información a un concentrador de medida). Estos equipos también permitirán al operador facturar a partir de una medida real.</p> <p>Para el caso concreto de vehículos de tracción diésel, también se plantea la instalación de caudalímetros y la medición automática y óptima del consumo de gasoil.</p>		

R.16. Potenciar el desarrollo de electrónica de potencia (a bordo) eficiente		
Inversión: 	Naturaleza: 	Mejora: 
Relación con los Retos: R.11 R.12 R.13 R.14		
<p>A diferencia de la aplicación en tierra, la electrónica de potencia embarcada puede considerarse muy bien estudiada. En todo caso sí se coincide en afirmar que el empleo de carburo de silicio en los equipos embarcados tendría mayores ventajas de uso que en los equipos en tierra. En proyectos recientes se constatan importantes reducciones de consumo energético debido a las menores pérdidas energéticas, menores necesidades de disipación térmica y menores volúmenes y pesos.</p> <p>El reto también debe incidir en la evolución y optimización de las estrategias de control de la electrónica, permitiendo operar el material móvil en su punto de operación más eficiente. Para ello propone trabajar en técnicas de identificación y aplicación del punto de operación de máximo rendimiento, optimizando el reparto de esfuerzo aplicado por los distintos equipos de tracción.</p>		

VII. EXPLOTACIÓN Y OPERACIÓN

Según se indicaba en el primer documento, la puesta en marcha de acciones en la infraestructura y el material móvil que optimicen la gestión energética del sistema, deben ir acompañadas de acciones que permitan operar de manera eficiente este material sobre esa infraestructura. Los retos identificados son recogidos en la siguiente tabla.

Reto	Descripción	Identificación en 2016	Avance desde 2016 (*)
R.17	Comprar energía eléctrica “verde”	No	-
R.18	Operar de manera eficiente la red eléctrica ferroviaria	Sí	Sí
R.19	Operar de manera eficiente el material móvil	Sí	Sí
R.20	Potenciar el autoconsumo	No	-
R.21	Potenciar la digitalización de la movilidad	No	-

Tabla 3. Resumen de los retos identificados en el área de Explotación y Operación.
(**): A juicio general de los organismos participantes en el documento.

R.17. Comprar energía eléctrica “verde”		
Inversión: <i>NP</i>	Naturaleza: 	Mejora: 
Relación con los Retos:		
<p>No existe un Mix energético particular para la red eléctrica ferroviaria siendo el mismo que caracteriza la demanda eléctrica del país correspondiente. En España existe un Mix muy distribuido, sin una clara preponderancia de una tecnología concreta aunque con un porcentaje elevado de generación mediante fuentes renovables.</p> <p>No obstante la compra de energía eléctrica “verde” por parte de las compañías ferroviarias es un reto positivo para una mayor descarbonización del ferrocarril (en términos indirectos). El consumo de energía eléctrica “verde” supone que la compañía eléctrica garantiza que con el dinero pagado por ese usuario se está produciendo el 100% de la energía que consume a partir de fuentes renovables.</p> <p>Una buena medida para fomentar la compra de energía verde sería la modalidad de compra agregada de energía (compra conjunta entre diferentes otros operadores ferroviarios).</p>		

R.18. Operar de manera eficiente la red eléctrica ferroviaria		
Inversión: 	Naturaleza: 	Mejora: 
Relación con los Retos:		
R.1 R.19		
<p>La operación eficiente de los distintos elementos de la red eléctrica ferroviaria es un reto que debe potenciarse considerando que no implica mayores costes para los administradores de la infraestructura. Como ya se indicó en el documento de 2016, la implantación futura de redes eléctricas de última generación <i>-inteligentes-</i> ayudará en gran medida a operar de manera eficiente la red. En este sentido la sensorización de todas las cargas eléctricas del sistema permitiría en última instancia adoptar consignas de operación óptimas, pudiendo disponer de datos que permitan emplearse para el</p>		

desarrollo de algoritmos que ayuden a operar de manera eficiente los vehículos (en consonancia con el reto R.19).

Mientras tanto deben identificarse estrategias de operación que sí permitan avanzar en ese camino. Un ejemplo de acción que se ha llevado a cabo estos últimos años estriba en la conveniencia de explotar algunas subestaciones de tracción de corriente alterna con un solo transformador. Esta medida tiene por objeto anular las pérdidas de vacío de uno de los dos transformadores de tracción de la subestación, dejándolo fuera de servicio. Debe tenerse en cuenta que el incremento de las pérdidas en carga que va a tener en el transformador que queda en servicio (y que debe asumir la totalidad de la carga asociada a la subestación) son inferiores a las pérdidas de vacío que se evitan al desconectar el otro transformador. Así, la desconexión de un transformador durante un año se ha comprobado que evitaría el consumo (por pérdidas de vacío) de entre 0,70 y 0,53 MWh/año.

La promoción de una topología operativa que promueva la generación de energía eléctrica de frenado y su aprovechamiento por otros trenes, es otra acción que puede potenciarse.

R.19. Operar de manera eficiente el material móvil		
Inversión: 	Naturaleza: 	Mejora: 
Relación con los Retos: R.18		
<p>Es imprescindible continuar potenciando el desarrollo y aplicación de estrategias de operación eficientes del material móvil, de manera que se maximicen las posibilidades de ahorro asociadas a los retos específicos de la infraestructura y del propio material. Como bien es conocido, la principal estrategia de ahorro energético asociado a la operación del vehículo es la conducción económica.</p> <p>Algunos desarrollos tecnológicos continúan centrándose en asesorar sobre la conducción manual como una ayuda para reducir el consumo. Son los sistemas de ayuda a la conducción o DAS. Estos sistemas reciben un tiempo objetivo que deben cumplir según el horario, y calculan la conducción que debe realizar el maquinista en el recorrido. Estos sistemas deben permitir el recálculo en tiempo real para poder adaptarse en caso de retraso o de cambio en el horario.</p> <p>En otro lado, se encuentran los desarrollos asociados a la integración de este tipo de estrategias sobre los sistemas ATO/ATP. Teniendo en cuenta que los servicios metropolitanos son una referencia en este tipo de desarrollos, de especial importancia son las iniciativas orientadas a la implantación de estas técnicas en el sistema interoperable ERTMS, por tanto en líneas interurbanas o de cercanías.</p> <p>Además de la conducción, la eficiencia energética se puede mejorar desde los sistemas de planificación y control de tráfico centralizado. En concreto, el diseño de horarios se puede realizar con criterios, no sólo de calidad del servicio sino también de eficiencia. El ahorro de energía en el diseño de horarios y en su recálculo online se puede conseguir mediante un reparto eficiente de los márgenes de tiempo a lo largo del recorrido (para que se aprovechen mediante conducción económica), mediante la sincronización de arranques y frenadas de trenes próximos (para mejorar el aprovechamiento de la energía regenerada) o para reducir los picos de potencia demandada en la subestación.</p> <p>De una manera más operativa, los operadores ferroviarios pueden continuar reduciendo el consumo de energía de los vehículos durante estacionamientos, potenciando su desconexión automática u optimizando el consumo energético para el pre-acondicionamiento.</p>		

R.20. Potenciar el autoconsumo		
Inversión: 	Naturaleza: 	Mejora: 
Relación con los Retos: R.4		
<p>La implantación de nuevas instalaciones de generación distribuida basadas en energías renovables para potenciar el autoconsumo puede representar una acción de gran interés estratégico para los administradores y operadores ferroviarios, disminuyendo en todo caso el consumo energético procedente de las redes externas.</p> <p>El autoconsumo puede tener una dimensión amplia, no solo a nivel de la alimentación eléctrica de edificios e instalaciones, sino también de las propias cargas de tracción.</p>		

R.21. Potenciar la digitalización de la movilidad		
Inversión: 	Naturaleza: 	Mejora: 
Relación con los Retos:		
<p>La movilidad como servicio se considera ya el estándar internacional para el futuro de las soluciones en movilidad. Se persigue que los usuarios tengan una experiencia de servicio unificado, de forma completamente transparente en su trayecto puerta a puerta, ya sea en modo público o privado.</p> <p>El desarrollo de aplicaciones digitales que ofrezcan soluciones integrales de movilidad a todos los usuarios, permitiendo planificar sus viajes desde que salen de sus casas hasta que llegan a su destino, reservando todos los servicios adicionales necesarios durante el trayecto y en destino, es un reto a considerar por parte de los operadores. Se trata de aplicaciones que permitan, entre otras funcionalidades, involucrar y concienciar al cliente en la reducción de la huella de carbono, no sólo en el trayecto en tren, sino en su viaje completo.</p> <p>La combinación y cooperación entre modos de transporte sostenibles proporciona indirectamente una mejora en la gestión energética, tanto desde el punto de vista del ahorro como desde el punto de vista de la no utilización de fuentes de energía contaminantes, lo que da como resultado una mejor calidad del aire y la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero.</p>		

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El ferrocarril debe continuar apostando por su mejora continuada en el campo de la gestión energética sostenible e inteligente. Puede afirmarse que desde 2016, año en el que se editó por primera vez el presente documento de posicionamiento, sí se ha experimentado un avance en algunos de los retos y recomendaciones identificadas en aquel momento.

Aunque la electrificación ya es una realidad en el sector ferroviario, todavía se tienen que optimizar los servicios que hacen uso del gasoil y en los que la electrificación puede no ser la mejor solución técnica.

Los organismos y empresas que han redactado el presente documento han identificado las siguientes recomendaciones generales:

1. Debe incentivarse la inclusión del factor energético en el diseño de los trazados ferroviarios.
2. Se debe continuar potenciando la implantación de sistemas de medida y facturación de energía eléctrica a bordo del material rodante.
3. Se debe continuar potenciando el desarrollo de las redes eléctricas ferroviarias del futuro (redes inteligentes).
4. Se debe continuar potenciando el desarrollo de nuevas tecnologías de almacenamiento así como su abaratamiento.
5. Se debe promover la utilización de la energía eléctrica regenerada en los procesos de frenado para usos distintos de la tracción, planteándola como una fuente de energía adicional.
6. Se debe potenciar el desarrollo de proyectos tecnológicos en el ámbito de la superconductividad aplicada al ferrocarril.
7. Se debe potenciar el desarrollo de proyectos ATO sobre ERTMS:
 - a. Es necesario profundizar en el desarrollo de los algoritmos de conducción embarcados y de los modelos de regulación del tráfico en tierra, para mejorar la eficiencia en la operación del sistema ATO sobre ERTMS.
 - b. En los sistemas ATO de tierra hay que desarrollar algoritmos para el diseño de horarios, tanto en planificación como en tiempo real, para la mejora de la eficiencia. Estos horarios tienen impacto en los picos de potencia medidos en subestaciones, en el aprovechamiento de la energía regenerada y en los márgenes disponibles para realizar conducción económica. Por lo tanto es necesario coordinar la explotación del tráfico con el control de las redes inteligentes y así optimizar el uso de la energía en la red ferroviaria, que pueden incorporar interacciones con otros puntos de consumo como alimentación de estaciones y vehículos eléctricos.
8. Se debe continuar potenciando el desarrollo de nuevas tracciones basadas en hidrógeno y biocombustibles.

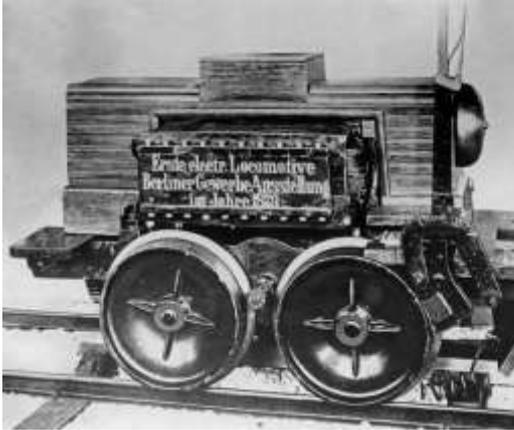
9. Sería de gran interés promover iniciativas y grupos de reflexión conjuntos para el uso del hidrógeno en el ámbito ferroviario, incluyendo toda la cadena de suministro.
10. Es necesario potenciar un marco normativo en los siguientes ámbitos:
 - a. Redes eléctricas inteligentes aplicadas al ferrocarril.
 - b. Uso del hidrógeno en el ferrocarril.
11. Es fundamental la coordinación entre todos los agentes del sector para no duplicar esfuerzos y desarrollar líneas de trabajo ya iniciadas.
12. Se debe promover la especialización en esta materia en algunas carreras técnicas universitarias.
13. Se debe promover el uso de herramientas armonizadas de análisis de ciclo de vida y ecodiseño, especialmente cuando se potencie el estudio de tecnologías novedosas como el hidrógeno.

ANEXO

Principales hitos del uso de la energía eléctrica en el ferrocarril

Ámbito mundial

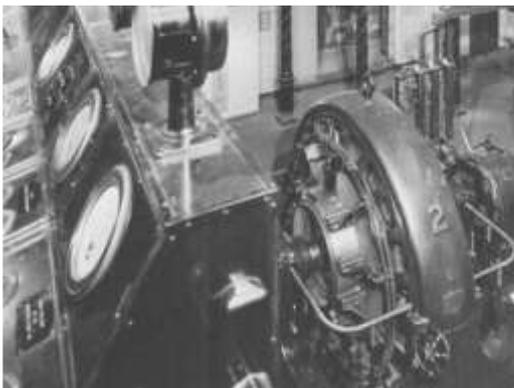
1879. Nace la tracción eléctrica en Berlín, con un tractor eléctrico de W. Siemens.



Siemens

1888. Primera red de tranvías eléctricos urbanos en Richmond, Virginia, Estados Unidos.

1890. Primer metro eléctrico en Londres con corriente continua. Hasta 1927, aproximadamente, todas las electrificaciones de corriente continua harán uso de máquinas rotativas para la generación directa de la corriente continua, no existiendo como tal el proceso propio de rectificación.



London Transport Museum

1895. Primera electrificación de una línea principal ferroviaria: Túnel de la compañía "B&O" en Baltimore, Maryland, Estados Unidos

1895. Primera red de tranvías eléctricos urbanos en Kioto, Japón.

1898. Primera electrificación de una línea en Europa con ancho 1.435 mm, entre Burgdorf y Thun, en Suiza, con corriente alterna trifásica.

1900. Electrificación de la línea Austerlitz-Orsay, en París, a 600 V en corriente continua (CC).

1902. Primera electrificación italiana con corriente trifásica: línea de *La Valtellina*.

1903. Primer récord de velocidad por encima de los 200 Km/h, en Alemania, entre las estaciones de Berlín-Marienfeld y Zossen, con dos automotores trifásicos.



Siemens

1905. Ensayos de la empresa Oerlikon entre las estaciones de Seebach y Wettingen, Suiza, a 15.000 V y 16,7 Hz en corriente alterna (CA).

1906. Electrificación en Suiza del túnel del Simplon, entonces el más largo del mundo, con tracción trifásica, realizada por la empresa Brown-Boveri.

1906. Electrificación de la Grand Central Terminal, en Nueva York, a 660 V en CC, impulsada por la empresa General Electric.

1906. Comienzo de la explotación en la línea japonesa Ochanomizu-Nakano, a 600 V en CC.

1907. Electrificación del ferrocarril New Haven (NH) a 11.000 V y 25 Hz en CA, por la empresa Westinghouse. NH se convierte en el ferrocarril con mayor densidad de tráfico del mundo con tracción eléctrica en los años 20.



Four-Track Arthur Bridge with Circuit Breakers and Section Breaks.

Wikiwand

1912. La compañía suiza BLS inaugura el túnel de Lötschberg, electrificado a 15.000 V y 16,7 Hz en CA.

1915. Electrificación a 3.000 V en CC de la línea transcontinental de Milwaukee Road en Montana, Estados Unidos.



American Rails

1917. Electrificación a 1.500 V en CC de la línea inglesa Shildon-Newport. Gran Bretaña comienza a impulsar electrificaciones en corriente continua en otros países.

1920. Electrificación del túnel de San Gotardo, en Suiza, a 15.000 V y 16,7 Hz en CA.

1922. En Francia, el Midi inaugura la primera línea francesa electrificada a 1.500 V en CC, que había sido elegido sistema unificado en Francia en 1920.

1925. Primera electrificación a 1.500 V en CC en India, en la línea Bombay- Kurla.

1928. Primera electrificación a 3.000 V en CC en Italia, sistema que irá sustituyendo las electrificaciones trifásicas en el norte del país hasta 1976.

1935. Finalización de la electrificación de la línea entre Washington y Nueva York, en Estados Unidos, de la compañía Pennsylvania, que pasa a ser la principal explotación con tracción eléctrica de todo el mundo antes de la Segunda Guerra Mundial.

1951. La compañía ferroviaria francesa SNCF anuncia el éxito de sus ensayos realizados con el nuevo sistema de electrificación a 25.000 V y 50 Hz en CA, que se convertirá en el más empleado en todo el mundo.

1954. La línea Valenciennes-Thionville es la primera electrificación francesa a 25 000 V y 50 Hz en CA, en configuración *monofásica simple* (1x25 kV).



SNCF

1955. Récord mundial de velocidad en Francia con la locomotora BB-9004 (331 km/h) bajo sistema de 1.500 V en CC.



SNCF - CAV - Lucien Delille

1964. Inauguración en Japón del Tokaido Shinkansen, primera línea de alta velocidad del mundo (210 km/h) con sistema de 25.000 V y 60 Hz en CA, en configuración *Booster*.



Internet Archive

1965. A mediados de los años 1960 puede situarse el inicio del **primer período de la aplicación de la electrónica de potencia en la tracción**, conservando aún el motor de corriente continua. Esta revolución de la tracción comienza con la aplicación del diodo de silicio, y luego, durante los años 70, con la del tiristor. Los diodos de silicio permiten afianzar definitivamente el desarrollo de la tracción eléctrica a 25.000 V y 50 Hz en CA, la tracción diésel con transmisión eléctrica trifásica/continua y la sustitución de los rectificadores de mercurio en las subestaciones de tracción (esta tecnología se había afianzado desde el año 1927 respecto al uso de máquinas rotativas para la generación directa de la corriente continua). La primera aplicación experimental del diodo de silicio se registra en las últimas locomotoras BB-12000 de la SNCF, en 1960.

1970. En el caso de la corriente continua, los tiristores rápidos permiten desarrollar el chopper en Japón.

1979. Aparecen en Alemania las cinco locomotoras eléctricas prototipo de la serie E 120 de la compañía estatal DB, con motores asíncronos, y que fueron las pioneras de la tracción trifásica en Europa. En 1987 se inicia la recepción de 60 locomotoras E 120 en Alemania. Previamente, en Japón ya se había aplicado la tracción trifásica en diversas unidades de tren.



DB

1981. Inauguración en Francia de la primera parte de la nueva línea de alta velocidad París-Lyon, que constituye realmente el comienzo de la Alta Velocidad en Europa. El sistema empleado es 25.000 V y 50 Hz en CA, en configuración AT (2x25 kV).



SNCF



SNCF

1985. A mediados de los años 80 puede situarse el inicio del **segundo período de la aplicación de la electrónica de potencia en la tracción**, sustituyendo el motor de tracción de corriente continua por el motor trifásico, asíncrono o síncrono. El desarrollo del tiristor GTO y del microprocesador permitió la introducción definitiva de la tracción trifásica hasta el año 2000. A partir de este año, los transistores IGBT desplazan a los GTO.

1988. La SNCF comienza la recepción de las locomotoras *Sybic*, que tienen tracción trifásica síncrona y son bicorriente 25.000 V y 50 Hz en CA/1.500 V en CC.

1.988. Récord de velocidad en Alemania con el tren experimental 401 (407 km/h) en la línea de alta velocidad entre Hannover y Würzburg.

1989. SNCF recibe los trenes TGV Atlantic, los primeros TGV con motores trifásicos síncronos.

1990. Récord mundial de velocidad en Francia con la rama TGV Atlantic 325 (515,3 km/h).

1993. Primera aplicación en el mundo de los nuevos transistores IGBT en el Metro de Tokio.

1996. Récord de velocidad en Japón con el tren experimental 300X (443 km/h) en el Tokaido Shinkansen.

2002. Se publica la primera Especificación Técnica de Interoperabilidad (ETI) para el *subsistema Energía* de líneas de alta velocidad.

2007. Récord mundial de velocidad en Francia, el 3 de abril, con la rama experimental V150 (574,8 km/h). Este récord no ha sido superado actualmente. Este tren utilizó por primera vez motores de imanes permanentes, con una eficiencia superior al motor trifásico convencional.



RFF

2008. Tras el récord mundial de velocidad de 2007, la multinacional francesa Alstom presenta un nuevo modelo de tren de alta velocidad, denominado AGV, dotado de motores de tracción de imanes permanentes.



Alstom

2009. Este año puede considerarse como el año en el que administraciones y operadores ferroviarios de multitud de países comienzan a potenciar el desarrollo de proyectos orientados a la recuperación de la energía eléctrica de frenado de los trenes en redes de CC. Destacarán proyectos en el campo del almacenamiento de energía y de la devolución de esa energía a la red externa, soluciones ambas que precisan de innovadores equipos electrónicos de potencia.

2010. El 3 de diciembre de 2010 un tren CRH 380A alcanzó en China 486 km/h, entre las ciudades de Zaozhuang y Bengbu. El principal hecho distintivo de estos ensayos es que en ellos se emplea un tren comercial, no prototipo, sin ningún tipo de modificación en la cadena de tracción.

2015. El Instituto de Investigación Tecnológica de Japón (RTRI) ensaya cables superconductores en un sistema de electrificación aérea para una línea de viajeros en corriente continua. Se constata que con este tipo de cables pueden obtenerse considerables ahorros de energía así como mejoras en la estabilidad del voltaje. Hasta este momento nunca se habían realizado ensayos reales sobre una línea.

2015. Concluye el proyecto de investigación europeo MERLIN (*Sustainable and intelligent management of energy for smarter railway systems in Europe: an integrated optimisation approach*), pudiéndose considerar como la

considerar como la base de partida para el desarrollo de futuros proyectos y nuevos sistemas de gestión *inteligente* de la energía eléctrica del ferrocarril. Este proyecto se desarrolló al amparo del VII Programa Marco de Investigación de la CE.

2018. En el marco del Programa de Investigación H2020 de la CE, concluye el proyecto de investigación europeo IN2RAIL (*Intelligent Railway*), en el que se estudia la concepción y desarrollo de nuevas subestaciones de tracción de corriente alterna basadas en equipos STATCOM, permitiéndolas regular de forma activa todos los flujos de potencia del sistema. Adicionalmente se avanza en el desarrollo y estandarización de una red ferroviaria con gestión integrada de los consumos. Este proyecto dio lugar al actual *proyecto In2Stempo*, que prevé finalizar en 2022 y que plantea la aplicación práctica de prototipos de los desarrollos anteriores. Este proyecto se desarrolla en la iniciativa tecnológica Shift2Rail.

Ámbito nacional

1911. Primera electrificación española, entre Gergal y Santa Fe, con corriente trifásica, inspirada en la del túnel del Simplon.



Ralf Reinhold/El Ferrocarril en Andalucía

1946. El 25 de enero de este año se aprueba el Plan General de Electrificación de las líneas de ancho *normal* que constituyen la Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles. En términos generales se estandariza el uso en esta red de 3.000 V de CC y se normaliza el uso de rectificadores de mercurio en las subestaciones.

1967. RENFE inicia la recepción de las locomotoras 7900, primeras locomotoras japonesas en Europa. Son locomotoras universales con bogie monomotor y birreductor, tecnología que dominará la tracción eléctrica española hasta 1985.



RENFE

1982. RENFE recibe las locomotoras de la serie 251, que marcaron la primera gran aplicación del chopper en España.



JCMA

1987. Récord de velocidad en España con el prototipo del electrotren basculante 443-001 (*Platanito*), alcanzando 206 km/h bajo sistema 3.000 V de CC.



RENFE

1989. RENFE comienza la recepción de los veinte electrotrenes que constituyen el tercer lote de la serie 448, y que constituirá el último material de tracción eléctrica con motor de corriente continua empleado por la empresa.

1992. Inauguración de la primera línea de alta velocidad en España, entre Madrid y Sevilla, con los nuevos trenes de la serie 100 (trenes AVE), dotados de motores trifásicos síncronos. Ese mismo año comienza la recepción de las locomotoras 252, con tracción trifásica asíncrona, y que han marcado un hito importante en el desarrollo europeo de la tracción trifásica. A nivel de la infraestructura se emplea un sistema a 25.000 V y 50 Hz en CA, en configuración *monofásica simple* (1x25 kV).



RENFE

1993. Récord de velocidad en España con el tren AVE 100-015 (357 km/h) en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla.

1998. Metro de Madrid pone en servicio la primera línea con electrificación a 1.500 V con CC. Se trata de la Línea 8. A partir de este momento Metro de Madrid comenzará a implantar este sistema en el resto de las líneas de gálibo ancho.

2001. Récord de velocidad en España con el prototipo de la serie 102 (359 km/h) en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla.

2003. Inauguración de la segunda línea de alta velocidad en España entre Madrid y Lérica (futura línea Madrid-Barcelona). El sistema empleado es 25.000 V y 50 Hz, en configuración *AT* (2x25 kV), primera vez que se emplea en la red ferroviaria española.



JCMA

2005. Inicio en España de la explotación comercial con los nuevos trenes de la serie 102. Utilizan transistores IGBT. Previamente, el prototipo empleado para su homologación constituyó una de las aplicaciones más significativas a nivel mundial de este tipo de semiconductores. Con dicho prototipo se estableció en 2002 un récord de velocidad en España (362 km/h) en la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona (trayecto Zaragoza-Lérica), durante su fase de construcción.



José C. Martínez



RENFE

2005. Nuevo récord de velocidad en España con un tren de la serie 102 (367 km/h) en la línea de alta velocidad Madrid-Lérida.

2006. Récord de velocidad en España con un tren de la serie 103 (402 km/h) en la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona, trayecto Alcolea del Pinar-Las Inviernas.



JCMA

2008. Tras varios años de trabajo, el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, ADIF, finaliza el desarrollo de una planta de almacenamiento de la energía de frenado de los trenes en redes de 3.000 V de CC, basada en el empleo de volantes de inercia. La planta se desarrolló en las inmediaciones de la estación de Madrid-Atocha.



ADIF

2009. Se publica el Real Decreto 1011/2009, de 19 de junio, por el que se regula, entre otros aspectos, los vertidos a la red de energía eléctrica para aquellos consumidores que implanten sistemas de ahorro y eficiencia energética. De esta manera, en aquellos momentos en los que la energía eléctrica ahorrada no pueda ser consumida en la propia instalación, se podrá verter dicha energía a la red cumpliendo una serie de requerimientos previos. Dicho decreto potenció desde ese momento la implantación de este tipo de sistemas por parte de los gestores y operadores ferroviarios, principalmente onduladores o inversores de potencia en las subestaciones eléctricas de corriente continua.

2010. Metro de Bilbao implanta en la subestación de Ripa (Bilbao) el primer inversor de potencia en España, en sistema 1.500 V de CC. Permite recuperar y reutilizar el 8% de la energía de los trenes.

2011. ADIF patenta un procedimiento de carga de vehículos eléctricos desde la red eléctrica ferroviaria, desarrollando adicionalmente toda la tecnología asociada. El sistema se conoce popularmente como *Ferrolinera*.

2013. Metro de Madrid implanta la conducción eficiente de trenes metropolitanos con ATO, comenzando en la Línea 3.

2014. ADIF implanta en la subestación de La Comba (Málaga) un inversor de potencia, en sistema 3.000 V de CC, constituyendo en ese momento el primer inversor del mundo a esa tensión empleando semiconductores IGBT. Años después este desarrollo ha sido extendido a otras subestaciones de tracción distribuidas por toda la red española.

2016. La Plataforma Tecnológica Ferroviaria Española, PTFE edita la primera versión del documento sobre posicionamiento sobre Gestión energética sostenible e inteligente en el ámbito ferroviario.

2021. ADIF pone en servicio una estación de recarga rápida de vehículos eléctricos alimentada desde una línea de transmisión de CA. Además desarrolla en la estación de Madrid-Atocha una instalación experimental para probar convertidores electrónicos de potencia desde la línea de transmisión de CC y alimentar también vehículos eléctricos.



ADIF

Coordinación Científico - Técnica:



José Conrado Martínez

Documento elaborado por:



Eugenio Peregrín
Inés Vadillo
Irene De María



Ruth Arregui



DNV
Jorge Aldegunde



Oriol Juncadella



Alfonso Horrillo
José I. Domínguez



Belén Medina



Félix Marín
Milan Prodanovic



Anabel Soria



Garazi Carranza



Ramón Madero



Fernando J. Rodríguez



Alberto Montes



Francisco J. González
Irene Donaire
Santos Núñez del Campo
Valentín Alegría



Enrique Gómez



Santiago Sanz



Jesús María Sahún



Francisco Díez
Iñaki Bravo



Iván Altaba
Juan Jiménez



Adrián Fernández
Antonio Fernández
Paloma Cucala
Ramón Rodríguez



Antonio Moreno



Universidad de Oviedo

Sergio González-Cachón
Héctor García



Emilio Larrodé



Ignacio Villalba

Coordinación y Secretaría Técnica:

Ángeles Táuler, M^a Mar Sacristán, Aida Herranz, Eduardo Prieto